

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství**

**Expoziční jednotka UV LED pro osvit desek plošných spojů, BC**

**LED UV exposure unit for Diy PCBs, BC**

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Jiří Pospíšil**

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2601R004 Měřicí a řídicí technika

Téma:

**Expoziční jednotka UV LED pro osvit desek plošných spojů  
LED UV Exposure Unit for Diy PCBs**

Zásady pro vypracování:

1. Seznámení s výrobními procesy DPS s negativní a pozitivní světlocitlivou vrstvou.
2. Analýza možností osvitů DPS z hlediska typů zdrojů záření, doby osvitů, životnosti a ceny zářičů; seznámení s UV LED a jejich možnostmi pro osvit DPS.
3. Výběr vhodného typu UV LED pro vytvoření UV zářiče, volba rozmístění a vzdáleností mezi jednotlivými LED a osvětlovanou DPS pro dosažení homogenního záření v celé ploše; možnosti použití rozptylovače světla.
4. Návrh a realizace programovatelné expoziční jednotky pro jednoduchý a efektivní osvit jednostranných a oboustranných DPS; aktivní plocha osvětlování do formátu A4 s možností přepnutí na formát A5 nebo A6.
5. Expoziční jednotka bude disponovat řídicím mikrokontrolérem pro nastavení a měření doby osvitů, dále interfacem pro měření intenzity záření pomocí UV senzoru přímo v aplikaci nebo pouze k testovacím účelům (dle dostupnosti vhodného senzoru). Jednotka bude opatřena uživatelským rozhraním pro vizualizaci a nastavení měřených veličin.
5. Zhodnocení dosažených výsledků, možností navrženého hardware a budoucích vylepšení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ABEL, Martin a Radislav ŠMÍD. Plošné spoje se SMD: návrh a konstrukce. 1. vyd. Pardubice: Nakladatelství Platan, 2000, 218 s. Inspirace konstruktérům. ISBN 80-902-7332-7.
- [2] MANN, Burkhard a Radislav ŠMÍD. *C pro mikrokontroléry: ANSI-C, kompilátory C, spojovací programy - linkery, práce s ATMEGA AVR a MSC-51, příklady programování v jazyce C, nástroje pro programování, tipy a triky*. Vyd. 1. Praha: BEN, 2003, 279 s. Inspirace konstruktérům. ISBN 80-730-0077-6.
- [3] LCD : odborný CDROM o inteligentních LCD displejích. [CD-ROM]. Praha: HW server, c2002.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Kijonka**

Datum zadání: 18.11.2011

Datum odevzdání: 07.05.2013



---

doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.  
vedoucí katedry



---

prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení

*Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením  
pana Ing. Jana Kijonky.*

*Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.*

.....  
*Jiří Pospíšil*

*Datum odevzdání bakalářské práce: 7. 5. 2013*

## **Poděkování**

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Janu Kijonkovi za cenné rady, konzultace a připomínky spojené s mou prací.

## **Abstrakt**

Tento projekt se zabývá návrhem a konstrukcí expoziční UV LED osvitky jednostranných a oboustranných desek plošných spojů s měřením intenzity UV světla. Osvitka je řízena pomocí MCU (ATmega16) a disponuje uživatelským rozhraním tvořeným LCD rotačním enkodérem.

Možnosti pro uživatele jsou nastavení doby osvitu v závislosti na typu světlocitlivých DPS a zobrazení intenzity UV záření. UV záření je měřeno pomocí precizní fotodiodu (EPD-440-0/1,45).

## **Klíčová slova**

UV světlo, Osvitka DPS, DPS, atmega16, AD převodník, UV intenzita, světlo, fotodioda

## **Abstract**

This project deals with design and construction of UV LED exposure unit and bilateral printed circuit boards with the measurement of the intensity of UV light. Exposure unit is controlled by the microcontroller (ATMega16) and has a user interface consisting of LCD and rotary encoder. Possibilities for the user is setting the exposure time depending on the type of light sensitive PCB and display the intensity of UV radiation. UV radiation is measured using precision photodiode (EPD-440-0/1,45).

## **Keywords**

UV light, UV exposure unit, PCB, atmega16, UV intensity

## **Seznam použitých zkratk a symbolů**

PCB - Printed Circuit Board

UV - ultraviolet

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>HISTORIE DPS.....</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>MATERIÁL K VÝROBĚ DPS [6].....</b>	<b>9</b>
3.1	NEOHEBNÉ DPS .....	9
3.1.1	<i>Fenolformaldehydové pryskyřice .....</i>	<i>9</i>
3.1.2	<i>Epoxidové pryskyřice .....</i>	<i>10</i>
3.1.3	<i>Tvrzený papír a epoxidová pryskyřice.....</i>	<i>10</i>
3.1.4	<i>Skloepoxidový laminát.....</i>	<i>10</i>
<b>4</b>	<b>METODY VÝROBY DPS [6].....</b>	<b>10</b>
4.1	SUBTRAKTIVNÍ TECHNOLOGIE .....	10
4.2	SEMIDIATIVNÍ TECHNOLOGIE .....	10
4.3	ADITIVNÍ TECHNOLOGIE .....	10
<b>5</b>	<b>POSTUP VÝROBY DPS .....</b>	<b>11</b>
<b>6</b>	<b>TEORIE .....</b>	<b>12</b>
6.1	LED DIODY .....	12
6.1.1	<i>UV LED – OSV4YLS1C1A .....</i>	<i>13</i>
6.2	OPTICKÉ SNÍMAČE.....	14
6.2.1	<i>Fotovoltaický jev [1].....</i>	<i>14</i>
6.2.2	<i>Důležité parametry detektorů [1].....</i>	<i>16</i>
6.3	FOTODIODA [1].....	18
6.3.1	<i>Použití fotodiody [1] .....</i>	<i>20</i>
6.3.2	<i>Fotodiody EPD-440-0/1,45.....</i>	<i>21</i>
6.4	SENZORY MAGNETICKÉHO POLE [5] .....	22
6.4.1	<i>Integrované hallové senzory [5].....</i>	<i>23</i>
6.4.2	<i>Hallův senzor TLE4905L .....</i>	<i>23</i>
6.5	A/D PŘEVODNÍK [1].....	24
6.6	MIKROPROCESOR .....	26
6.6.1	<i>Popis.....</i>	<i>26</i>
6.6.2	<i>Výběr MCU .....</i>	<i>26</i>
6.6.3	<i>MCU ATmega16.....</i>	<i>26</i>
<b>7</b>	<b>KONSTRUKCE A ZAPOJENÍ.....</b>	<b>27</b>
7.1	ROZVRŽENÍ OSVITKY V KUFRU A ROZDĚLOVACÍ PLECH.....	27
7.2	MODUL LED .....	29
7.3	MĚŘIČ INTENZITY.....	32
7.4	ZAPOJENÍ ČASOVAČE.....	33
7.5	LCD MODUL.....	34
7.6	MODUL S ROTAČNÍM ENKODÉREM .....	34
7.7	REDUKCE KONEKTORU MLW10 NA D-SUB 9-PIN.....	35
<b>8</b>	<b>MĚŘICÍ ŘETĚZEC A ŘÍZENÍ OSVITU .....</b>	<b>35</b>
8.1	MĚŘENÍ NA JEDNÉ LED DIODĚ .....	35
8.2	MĚŘENÍ NA CELÉ PLOŠE OSVITKY .....	37
8.3	POHLCOVÁNÍ UV SVĚTLA SKLEM.....	38
8.4	DĚLKA OSVITU DPS .....	39
<b>9</b>	<b>OVLÁDÁNÍ OSVITKY .....</b>	<b>40</b>
<b>10</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>41</b>
<b>11</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>41</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>42</b>
<b>13</b>	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>43</b>
<b>14</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>43</b>

<b>15</b>	<b>OBSAH PŘILOŽENÉHO CD:.....</b>	<b>43</b>
-----------	-----------------------------------	-----------



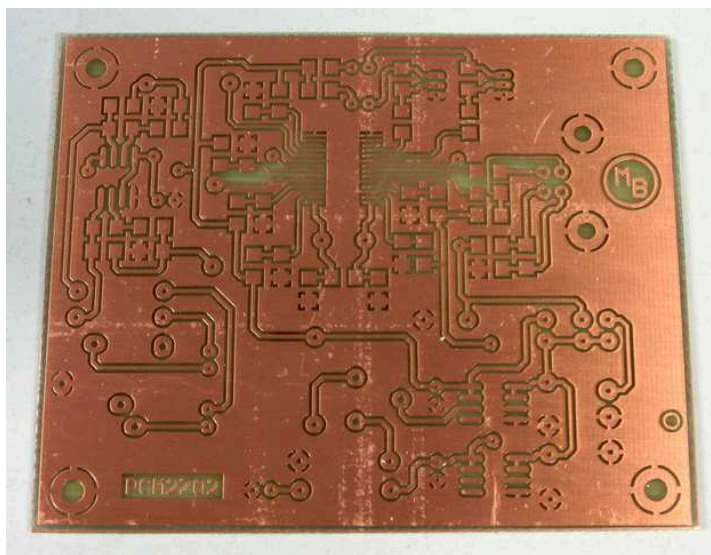
# 1 Úvod

Tématem této bakalářské práce je návrh a konstrukce UV osvitky desek plošných spojů (DPS). UV osvitka DPS je vhodná pro všechny kdo se zabývají návrhem a konstrukcí různých elektronických zařízení. Všichni si určitě vzpomeneme, jaké to je kreslit DPS pomocí fixy.

Metoda je to zdlouhavá a poměrně nepřesná. Dokonce i nepoužitelná, pokud chceme v zapojení použít součástky SMD, což jsou součástky určené pro plošnou montáž.

Co to vlastně je UV osvitka? Je to zdroj UV záření, o nižší vlnové délce než 400nm. Tímto světlem se následně osvětluje DPS, která leží na předloze DPS, vytištěné na běžné kancelářské tiskárně. UV osvitku lze doplnit o časovač, měřič intenzity UV světla,....

Tohle zařízení se dá i zakoupit, ale jeho cena je v řádech tisíců až desetitisíců korun.



Obrázek 1: Ukázka desky plošných spojů

## 2 Historie DPS

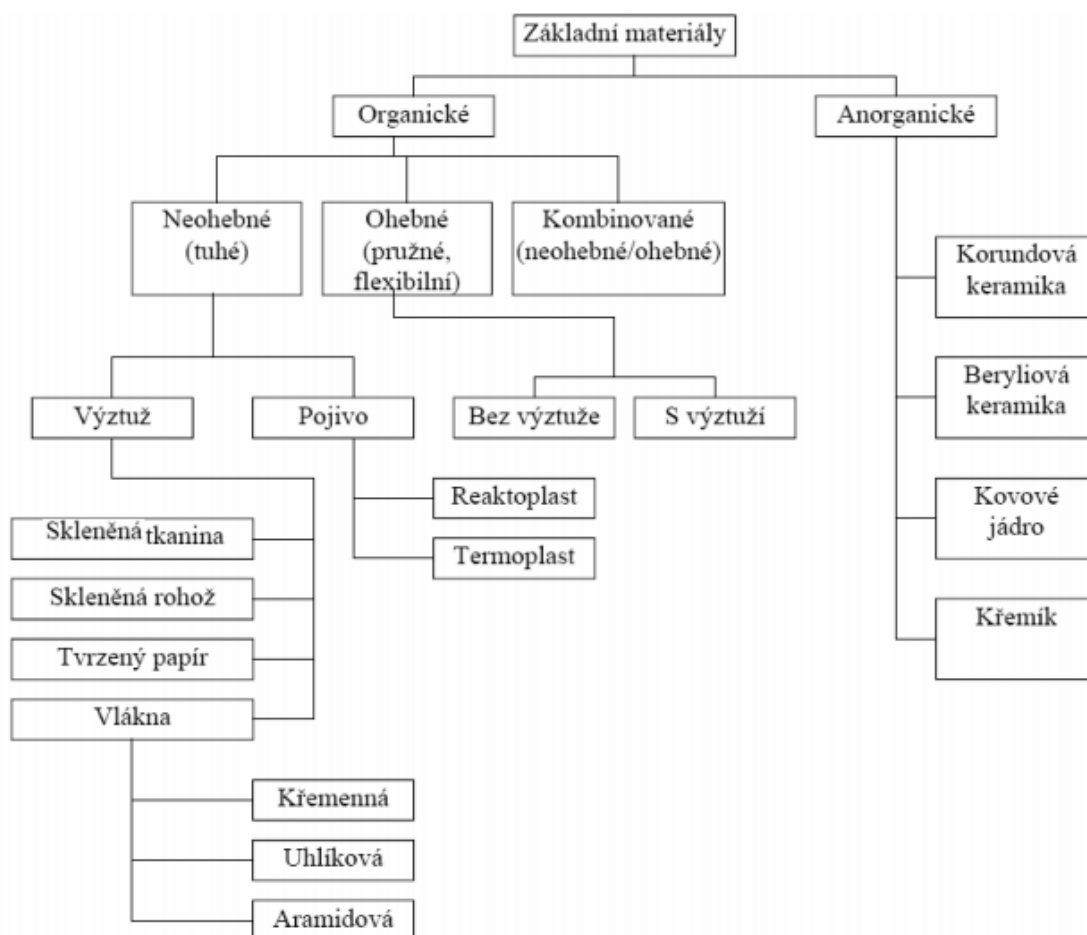
Vzájemné propojování elektronických součástek jde v celé historii elektroniky bok po boku s jejich modernizací. V samotném začátku byly vývody elektronických součástek propojovány pomocí šroubku. Na jedné straně umístěna součástka a na straně druhé propojovací drát. Toto si vyžadovalo velké rozměry desek, ale i součástek. Později se přecházelo na pájecí očka pod šroubky. Toto vedlo k drátovým, pájením spojovaným vývodům. Díky tomuto se mohly začít zmenšovat rozměry součástek. Samotné propojení bylo ještě drátové, ale ve 30. letech jsou prováděny první pokusy o jiné způsoby propojování na pevné podložce.

Zde vznikají první vodivé laky, kterými se na izolační desce vytvářejí spoje. Začátkem 40. let se objevují první praktické pokusy realizace amerického patentu z r. 1925 na odleptávání spojů. Tato metoda je velmi nákladná, proto se neujala. Až v 50. letech se úspěšně začíná dostávat do popředí.

### 3 Materiál k výrobě DPS [6]

Zvolený materiál pro výrobu desek plošných spojů je důležitý pro výslednou spolehlivost celého výrobku. U DPS se musí předpokládat, že bude vždy vystaveny různým okolním vlivům. Také je důležité volit materiál podle požadavků elektrického obvodu. Základní materiály si můžete prohlédnout na obrázku 2.

V této práci nás budou zajímat pouze neohebné DPS.



Obrázek 2: Materiály k výrobě DPS

#### 3.1 Neohebné DPS

##### 3.1.1 Fenolformaldehydové pryskyřice

Obsah této pryskyřice se pohybuje v rozmezí 35 – 58%. Čím je obsah pryskyřice větší, tím je i výsledný materiál tvrdší. Tento materiál je k často k vidění u jednovrstvých DPS a výjimečně u dvouvrstvých.

Je oblíben, protože se dobře vrtá a opracovává. Nevýhoda je, že vlhne a má malou odolnost vůči elektrickému oblouku, také má malou pevnost Cu folie v odtrhu. Teplotní odolnost je slabá a má horší mechanické vlastnosti. Materiál s vyšším obsahem této pryskyřice je křehký. Bývá označován jako FR-2 a je nehořlavý.

### **3.1.2 Epoxidové pryskyřice**

Materiály mají lepší elektrické, chemické a teplotní parametry. Přidávají se aditiva, které zlepšují celkové vlastnosti epoxidové pryskyřice (snižují teplotní součinitel délkové roztažnosti,...)

### **3.1.3 Tvrzený papír a epoxidová pryskyřice**

Nahrazují materiál FR-2 v náročnějších podmínkách. Oproti FR-2 má vyšší pevnost v odtrhu folie a méně navlhá. Tento materiál se značí jako FR-3.

### **3.1.4 Skloepoxidový laminát**

Jedná se o epoxidovou pryskyřici a skleněnou tkaninu. Skelné tkaniny (běžně impregnovány) jsou skládány do vrstev a laminovány s měděnou fólií. Epoxidová pryskyřice je vytvrzena během laminace a tento proces probíhá ve vakuu.

Výhodou takto vyrobené DPS jsou její mechanické a elektrické vlastnosti. Malá nasákavost,...

## **4 Metody výroby DPS [6]**

V dnešní době se používají 3 druhy postupů:

1. subtraktivní
2. aditivní
3. semiaditivní

### **4.1 Subtraktivní technologie**

Tento proces je nejrozšířenější. Zaujímá asi 90% celkové výroby DPS.

Použité materiály jsou nejčastěji plátovány s 35 $\mu$ m silnou mědí. Při leptání obrazce zde může dojít k podleptání spoje a tím ke zničení DPS. Pomocí této metody můžeme vyrobit spoj o tloušťce minimálně 0,3mm.

### **4.2 Semiaditivní technologie**

Tento proces vychází z materiálu bez vrstvy mědi, který se po odvrtání všech děr a úpravách povrchů pokoví celý i přes otvory mědi o síle 5 $\mu$ m. Následný proces je stejný jako u metody pokovování obrazce. Touto metodou můžeme vyrábět spoje s šířkou 0,15mm.

### **4.3 Aditivní technologie**

Tento proces také využívá materiál bez měděné vrstvy. Po odvrtání všech děr a opracování povrchu se přímo vytváří požadovaný vodivý obrazec. Měď (nebo jiný vodivý materiál) se nanáší chemicky. Tento proces má výhodu, že materiál není tepelně opracováván. Díky tomu se DPS nemůže zkroutit nebo jinak deformovat.

## 5 Postup výroby DPS

Celý proces výroby DPS pomocí fotocestou je rozdělen do 6 kategorií.

1. Nanesení fotocitlivého laku na DPS
2. Vytvoření předlohy vhodným softwarem
3. Osvícení DPS
4. Vyvolání osvětlené desky (uhlíčitan sodný, hydroxid sodný,...)
5. Leptání (chlorid železitý,...)
6. Závěrečné úpravy (vrtání, prokovování, ...)

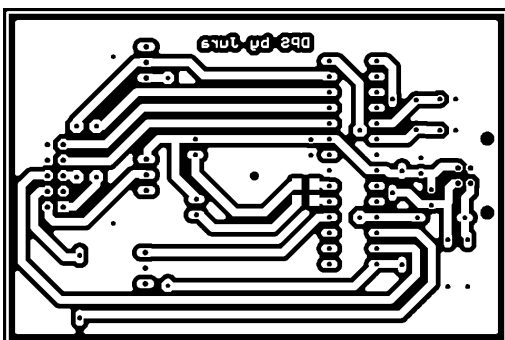
V procesu výroby DPS existují dva typy světlocitlivých laků, které se liší ve vzhledu matrice DPS a vývojky.

### I. Pozitiv:

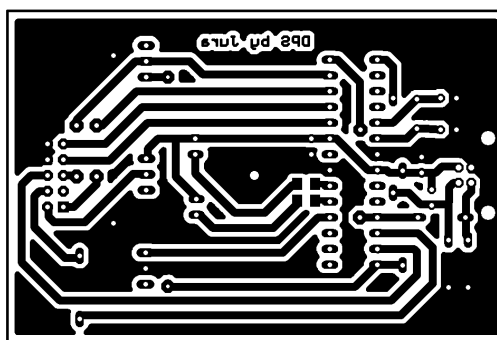
Jedná se o pozitivní fotocitlivý lak nanesený na DPS. Předloha pro výrobu DPS musí být nanášena tak, že to co se nemá odleptat musí být neprůhledné. Nevýhoda je velké spotřebě barvy v tiskárně a při nekvalitní matici může dojít k špatnému osvětlení DPS a tím k jejímu zničení. Jako vývojka se používá 10% roztok hydroxidu sodného. Tato vrstva je lehce omyvatelná pomocí lihu, nebo acetonu.

### II. Negativ:

Zde je nanášen negativní fotoresist. Má velkou výhodu v tom, že spoje které se osvítlí tam zůstanou. To je vhodné zejména pro plochy s rozlitou mědí. Tato metoda je levnější a výsledná kvalita je podstatně lepší. Pomocí této metody se dá vytvořit síla čáry o rozměru 10 mil (0,254mm) nebo motiv pro pouzdro TSSOP, kde je pájecí ploška 0,27 mm a rozteč mezi ploškami 0,5mm. Zde se jako vývojka používá 10% roztok uhlíčitanu sodného. Tato vrstva je odolná proti lihu, acetonu a jiným chemickým látkám. Vyleptaná deska se očišťuje v roztoku hydroxidu sodného.



Obrázek 3: Předloha DPS negativ



Obrázek 4: Předloha DPS pozitiv

## 6 Teorie

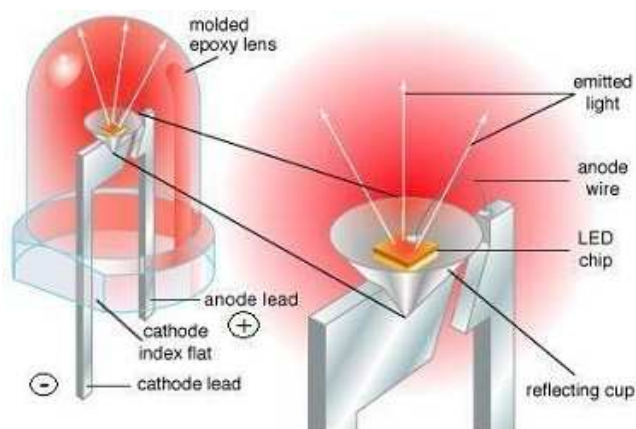
### 6.1 LED diody

Název LED pochází z anglického Light-Emitting Diode, v překladu Dioda emitující světlo.

Když diodou začne procházet el. proud, dochází na PN přechodu k rekombinaci volných elektronů a děr. Přitom se uvolňuje energie, která je přibližně rovna šířce zakázaného pásu. Tato energie se může vyzářit ve formě fotonu nebo být absorbována v krystalové mřížce. Toto se projevuje zvýšenou teplotou polovodiče.

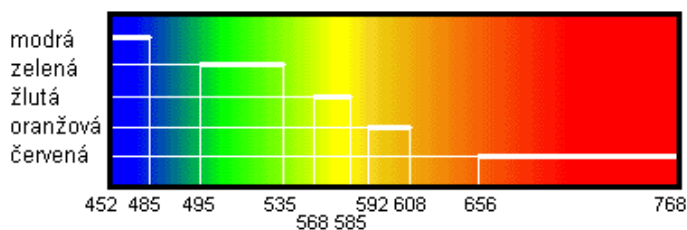
Pravděpodobnost zářivé rekombinace (s fotonem) roste se zvětšující se šířkou zakázaného pásu. U křemíku se šířkou zakázaného pásu 1.1 eV je uvolňovaná energie převážně absorbována v krystalu, ze kterého je tepelnou výměnou odevzdána do okolí. U diody z galium-arsenidu (GaAs) se šířkou zakázaného pásu 1.34 eV bude již nezanedbatelná část uvolněné energie při rekombinaci vyzařována ve formě fotonů o příslušné vlnové délce, která však ještě spadá do oblasti neviditelného infračerveného záření. Kombinací tohoto materiálu s fosforem, tzv. galium arsenik fosfor (GaAsP), již při rekombinaci vyzařuje červené viditelné světlo.

Použijeme-li jiný materiál o vhodné šířce zakázaného pásu, můžeme vytvořit diody svítící ultrafialovým světlem, .....



Obrázek 5: Schéma diody

Barva LED diody závisí na vlnové délce světla, která je dána materiálem a jeho úpravou. Čip neboli polovodičový přechod diod, je většinou tvořen GaP (Galium-Fosfor), nebo GaAsP (Galium-Arsenid-Fosfor). Na následujícím obrázku je vidět spektrum viditelného světla a jeho vlnové délky v nm.



Obrázek 6: Viditelné spektrum LED diod

	Barva	Vlnová délka	Látka
	Infračervená	$\lambda > 760$	GaAs AlGaAs
	Rudá	$610 < \lambda < 760$	AlGaAs GaAsP
	Oranžová	$590 < \lambda < 610$	GaAsP GaP
	Žlutá	$570 < \lambda < 590$	GaAsP GaP
	Zelená	$500 < \lambda < 570$	GaP InGaN
	Modrá	$450 < \lambda < 500$	ZnSe SiC
	Fialová	$400 < \lambda < 450$	InGaN Si
	Ultrafialová	$\lambda < 400$	AlN AlGaN

Tabulka 1 - základní materiály a vlnové délky LED diod

### 6.1.1 UV LED – OSV4YLS1C1A

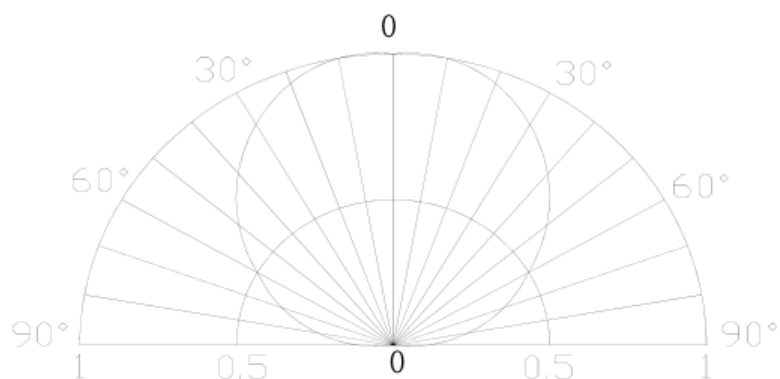
Jako zdroj UV světla byly v mé práci použity UV diody. Jedná se o typ OSV4YLS1C1A, které k dispozici nabízí pouze obchod tme.cz. Jedná se o SMD (pouzdro pro plošnou montáž) součástky.

**Nejdůležitější parametry jedné diody jsou:**

- Napětí v propustném směru 3,4V
- Proud v propustním směru 20mA
- Vlnová délka: 395nm
- Úhel: 120°
- Vyzářený výkon: 5mW

Graf směrovosti jedné diody je na obr. 7.

## ■ Directivity



Obrázek 7: Směrovost jedné diody

Z obrázku 7. je patrné, při úhlu  $15^\circ$  se veškeré záření diody vysvítí do plochy vyznačenou tímto úhlem. Ale při úhlu  $60^\circ$  se vyzáří 50% záření do plochy vyznačenou tímto úhlem a zbylých 50% se nerovnoměrně vyzáří kolem diody.

## 6.2 Optické snímače

Činnost součástek řízených světelným zářením je založena na využití fotovoltaiického jevu.

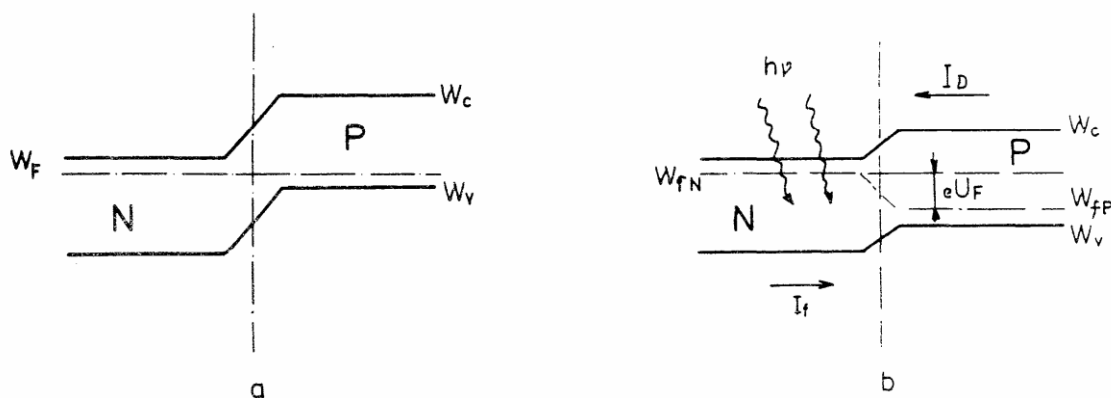
Při dopadu záření vhodné vlnové délky na polovodivý materiál, dochází k rozbití vazeb mezi atomy a tím ke vzniku volných nosičů elektron – díra. V látce, které neobsahuje PN přechod dojde ke zvýšení vodivosti. Dopadne-li záření do oblasti PN přechodu, objeví se mezi částí P a N hradlové napětí.



Obrázek 8: fotodioda

### 6.2.1 Fotovoltaiický jev [1]

Případ interakce záření s polovodičem obsahujícím PN přechod. Uveden případ přechodu PN, na který působí optické záření. Energetický pásový diagram neozářeného přechodu PN bez předpětí je na obr. 9a.



Obrázek 9: Energetický pásový diagram přechodu PN

a) v termodynamické rovnováze

b) při působení optického záření na oblast polovodiče N

Struktura je ve stavu termodynamické rovnováhy a celkový proud je nulový.

Ozáření částí polovodiče typu N se vytvoří páry elektron-díra. Pokud ke vzniku páru dojde ve vzdálenosti menší než je difusní délka nosičů, pak se elektrony a díry dostávají do ochuzené oblasti prostorového náboje, kde dochází vlivem elektrického pole k jejich rozdělení. Díry, pro které potenciální bariéra přechodu PN neexistuje, přejdou do polovodiče typu P. Tímto vznikne dodatečný proud  $I_f$ , vyvolaný zářením, který poruší termoelektrickou rovnováhu. Polovodič P se nabíjí kladně proti polovodiči N a energetické hladiny se posunují směrem dolů. Na přechodu PN dochází ke vzniku potenciálového rozdílu, který se projevuje jako vnější fotoelektromotorické napětí  $U_f$ . Toto napětí zmenšuje potenciálovou bariéru přechodu PN a vyvolává tak proud  $I_D$ , podobný proudu, který by diodou protlačilo vnější napětí  $U_f$ .

$$I_D = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eU_F}{k_B \Theta}\right) - 1 \right] \quad [A; A, V, -, K] \quad (1)$$

Kde:  $I_0$  je nasycený proud přechodu PN

$\Theta$  je absolutní teplota (K)

$k_B$  je Boltzmannova konstanta

Tento proces je naznačen na obr. 9 b).

$$\text{Mezi proudem } I_f \text{ a } I_D \text{ se vytvoří dynamická rovnováha } I_f = I_D \quad [A; A] \quad (2)$$

Napětí naprázdno nebo-li bariérové fotoelektromotorické napětí

$$U_f = \frac{k_B}{e} \ln\left(1 + \frac{I_f}{I_0}\right) \quad [V; -, A, A] \quad (3)$$

Proud nakrátko je dán velikostí fotoelektrického proudu:

$$I_f = S_\lambda \Phi \quad (4)$$

Kde:  $\Phi$  je zářivý tok,  $S_\lambda$  je spektrální citlivost fotodiody



### 6.2.2 Důležité parametry detektorů [1]

- spektrální citlivost
- šumové vlastnosti
- dynamické vlastnosti
- převodní charakteristika

Spektrální citlivost je základním parametrem detektoru, která je definována jako podíl odezvy detektoru  $dU_\lambda$  k dopadajícímu monochromatickému zářivému toku  $d\phi_{(\lambda)}$

$$S_\lambda = \frac{dU_\lambda}{d\phi_{(\lambda)}} \quad (5)$$

Závislost spektrální citlivosti na vlnové délce záření vytváří spektrální charakteristiku detektoru, která udává, pro jaký obor vlnových délek je detektor využitelný. Při snímání slabých signálů má důležitou roli šum detektoru, který omezuje jeho využitelnost. Důležitým pojmem je prahový zářivý tok nebo také maximální detekovaný výkon, který je definován jako minimální hodnota zářivého toku  $\phi_{pr}$  dávající na vstupu detektoru signál shodný s energetickou úrovní vlastních šumů detektoru. A platí pro ni:

$$\phi_{pr} = \frac{\sqrt{I_N^{-2}}}{S} \quad (6)$$

Kde:  $I_N^{-2}$  je střední kvadratická hodnota šumového proudu  
S je citlivost detektoru

V některých případech se u detektoru optického záření udává tzv. ekvivalentní šumový výkon NEP (Noise Equivalent Power) vztahem:

$$NEP = \frac{\Phi_{pr}}{\sqrt{B}} \quad (7)$$

Kde: B je šířka kmitočtového pásma  
 $\Phi_{pr}$  je velikosti zářivého toku

K celkové hodnotě šumu přispívá několik složek. Především jde o tepelný šum, který má svůj původ v tepelných fluktuacích koncentrace volných nosičů. Střední kvadratická hodnota proudu tepelného šumu je dána vztahem:

$$I_t^{-2} = \frac{1}{R} 4k_B \Theta B \quad (8)$$

Kde: R je sériový odpor fotodetektoru  
 $k_B$  je boltzmanova konstanta  
 $\Theta$  je teplota

U fotodetektorů s přechodem PN vzniká dále tzv. výstřelkový šum v důsledku fluktuace injekce nosičů. Střední kvadratická hodnota tohoto šumu je závislá na celkovém odporu procházejícím proudem.

$$I_D = I_0 + S\Phi \quad (9)$$

$$I_V = 2eI_D B^{-2} \quad (10)$$

Kde:

$I_0$  je

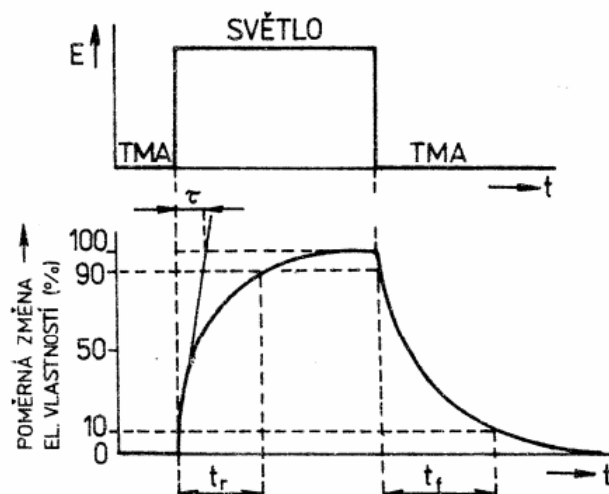
proud za tmy (dark current)

Název	f/Hz	$\lambda$
Technické střídavé proudy	$16 - 10^2$	18000 km – 3000 km
Střídavé proudy při telefonii	$10^2 - 10^4$	3000 km – 30 km
Rádiové vlny	$10^4 - 10^{13}$	30 km – 0,03 km
Dlouhé vlny	$1,5 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^5$	2000 m – 1000 m
Střední vlny	$0,5 \cdot 10^6 - 2 \cdot 10^6$	600 m – 150 m
Krátké vlny	$0,6 \cdot 10^7 - 2 \cdot 10^7$	50 m – 15 m
Velmi krátké vlny	$0,2 \cdot 10^8 - 3 \cdot 10^{13}$	15 m – 1 m
Mikrovlny	$3 \cdot 10^8 - 10^{13}$	1 m – 0,03 mm
Optické záření	$10^{12} - 3 \cdot 10^{16}$	0,3 mm – 10 nm
Infračervené záření	$10^{12} - 3,8 \cdot 10^{14}$	0,3 mm – 790 nm
Viditelné záření	$3,8 \cdot 10^{14} - 7,7 \cdot 10^{14}$	760 nm – 390 nm
- střední červená	$4,6 \cdot 10^{14}$	650 nm
- střední oranžová	$5 \cdot 10^{14}$	600 nm
- střední žlutá	$5,2 \cdot 10^{14}$	580 nm
- střední zelená	$5,75 \cdot 10^{14}$	525 nm
- střední modrá	$6,7 \cdot 10^{14}$	450 nm
- střední fialová	$7,5 \cdot 10^{14}$	400 nm
Ultrafialové záření	$7,7 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$	400 nm – 10 nm
Rentgenové záření	$3 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{20}$	10 nm – 1 pm
Záření gama	$> 10^{18}$	< 300 pm

Tabulka 2: Přehled elektromagnetického záření

Dalším typem šumu je šum  $I/f$ , který se uplatňuje při nízkých kmitočtech (řádově stovky Hz). Původcem tohoto typu šumu jsou fluktuace povrchových svodových proudů.

Dynamicke vlastnosti detektorů jsou velmi důležité pro většinu aplikací. Udávají se nejčastěji v podobě přechodové charakteristiky. Tj. odezvou na jednotkový skok zářivého toku. Viz obr 10.



Obrázek 10: Přebodová charakteristika detektorů

Převodní charakteristiky detektorů udávají závislost citlivosti na velikosti dopadajícího zářivého toku. Při malých hodnotách zářivého toku bývá citlivost konstantní, při větších hodnotách ozáření citlivost klesá.

### 6.3 Fotodioda [1]

Jedná se o nelineární nesouměrný jednohnan, řízený dopadajícím zářivým tokem. Princip funkce fotodiody byl popsán v kapitole (6.4 optické snímače).

Vlivem zářivého toku vzniká na fotodiodě bariérové fotoelektromotorické napětí, které je dané vztahem:

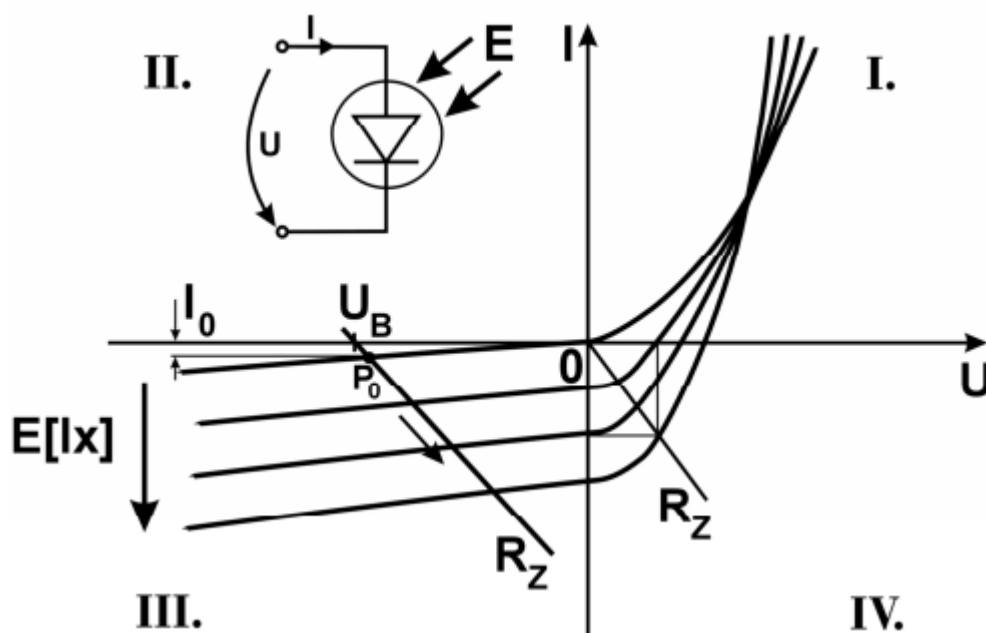
$$U_f = \frac{k_B}{e} \ln \left( 1 + \frac{I_f}{I_0} \right) \quad (11)$$

Typická VA charakteristika fotodiody jsou na obr. 11.

Fotodiodu lze připojit dvěma způsoby, které určují její pracovní režim:

- Zapojíme-li fotodiodu v závěrném směru v sérii se zdrojem stejnosměrného předpětí a zatěžovacím rezistorem  $R_Z$ , chová se dioda jako rezistor řízený osvětlením. Tento režim je označován jako fotovodivostní. Pracovní bod se podle intenzity osvětlení posouvá po odporové přímce  $R_Z$  ve třetím kvadrantu VA charakteristiky. V tomto kvadrantu jsou charakteristiky rovnoběžné a téměř ekvidistantní.
- V režimu hradlovém (fotovoltaičském) je fotodioda zdrojem fotovoltaičského napětí a pracuje ve čtvrtém kvadrantu. Velikost zatěžovacího odporu má za následek tyto režimy: fotovoltaičský režim nakrátko, naprázdno a výkonově optimální (tento nastává v případě, kdy obdélník, (obr. 11) má největší plochu.

V prvním kvadrantu jsou VA charakteristiky nejhustší, fotodioda je zde nejméně citlivá na světlo.



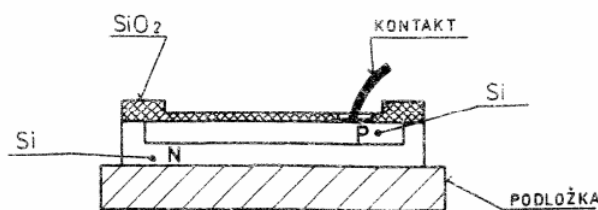
Obrázek 11: Přechodová VA charakteristika fotodiody

Fotodiody, které slouží k detekci optických signálů, mají pracovní bod nastaven do 3. kvadrantu. U neosvětlené diody leží pracovní bod v místě  $P_0$ , po osvětlení se pohybuje po zatěžovací přímce směrem k větším proudům. V této oblasti je dosahováno největší citlivosti a nejlineárnější převodní charakteristiky. Tyto diody se nazývají odporové a mívají velké závěrné napětí.

Diody mající malé závěrné napětí, mohou pracovat jen ve 4. kvadrantu a nazývají se hradlové. Dobrou linearitu získávají při malých pracovních odporech. V tomto režimu se diody využívají jako sluneční baterie.

Spektrální charakteristika fotodiody závisí na použití materiálu. Nejširší použití při přípravě fotodiody má křemík. Ale často se používají i jiné materiály (Ge, GeAs, Selen, GaInAs,...)

Fotodiody mají všeobecně velkou citlivost, malý proud za tmy (dark current) velkou zatížitelnost bez únavy a dlouhodobou stálost. Jsou velmi citlivé na vlhkost, proto musí být kvalitně zapouzdřeny. Vlastnosti jsou ovlivněny teplotou. Přechod PN může být připravován slitinovou technologií, difúzí, nebo epitaxním růstem. Nejrozšířenější je planární přechod PN (obr. 12.).

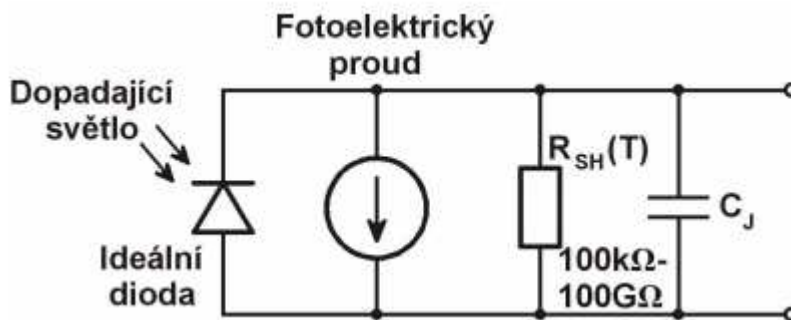


Obrázek 12: znázornění planárního PN přechodu

Oxid křemičitý na povrchu diody slouží nejen k pasivaci, ale i jako antireflexní vrstva, která zvyšuje citlivost fotodiody.

### 6.3.1 Použití fotodiody [1]

Fotodiody generují proud, který je úměrný intenzitě osvětlení. Náhradní schéma fotodiody je znázorněno na obr. 13.



Obrázek 13: Náhradní schéma fotodiody

Proud nakrátko je lineární přes 6 až 9 dekad intenzity osvětlení a proto se používá pro měření intenzity osvětlení.

Napětí naprázdno se v propustném směru mění logaritmicky s úrovní intenzity osvětlení a proto se pro měřicí účely nepoužívá.

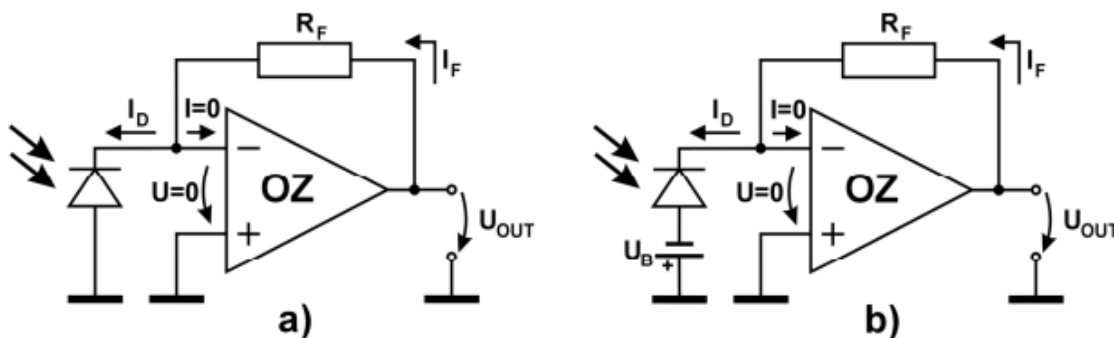
Odporový bočník  $R_{SH}$  je v řádech tisíců  $M\Omega$ , který s teplotou klesá.

Kapacita  $C_J$  představuje kapacitu přechodu PN. Tato kapacita ovlivňuje šířku pásma i šumové vlastnosti. Kapacitu lze snížit přiložením závěrného napětí na fotodiodu.

Fotodiodu lze provozovat s nulovým nebo záporným předpětím.

Připojení diody k nulovému předpětí dosahujeme přesnější lineární převod. Pokud ale chceme vyšší snímací rychlost, musíme diodu připojit k zápornému předpětí.

Pracovní režimy fotodiody, jsou znázorněny na obr. 14.



Obrázek 14: Pracovní režimy fotodiody

- a) režim nulového předpětí
- b) režim záporného předpětí

#### Porovnání režimů

##### a) režim nulového předpětí

- nulový proud za tmy
- lineární závislost
- nízký šum
- pro přesné aplikace

**b) režim záporného předpětí**

- projevuje se proud za tmy
- zhoršení linearity
- zvýšení šumu
- použití pro vysokorychlostní aplikace

Pracovní režimy fotodiody tvoří převodníky proudu na napětí.

Invertující vstup operačního zesilovače tvoří virtuální zkrat, do kterého teče nulový proud, a který je na potenciálu neinvertujícího vstupu OZ. Aby proud tekoucí do invertujícího vstupu byl roven 0, musí proud fotodiodou roven proudu zpětnovazebním odporem:

$$I_D = I_F \quad [A; A] \quad (12)$$

Kde:  $I_D$  proud fotodiodou  
 $I_F$  proud zpětnovazebním odporem

Kladná výstupní napětí převodníku I/V bude úměrné intenzitě osvětlení fotodiody a velikosti zpětnovazebního odporu.

Proud zpětnovazebním odporem je dán vztahem:

$$I_F = \frac{U_{OUT}}{R_F} \quad [A; V, \Omega] \quad (13)$$

Kde:  $U_{OUT}$  je napětí na výstupu OZ

$R_F$  je hodnota zpětnovazebního rezistoru

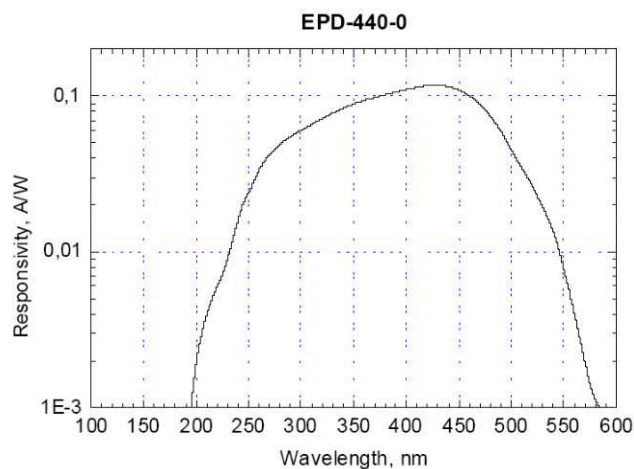
### 6.3.2 Fotodioda EPD-440-0/1,45

Jedná se o fotodiodu, která bude použita k měření intenzity UV světla. Tato fotodioda se vyznačuje šířkou a výškou spektrální citlivosti v UV a ve viditelném spektru (190nm – 570nm) a také nízkou cenou.

Použití je například v medicíně, především pro dermatology, solária nebo pro měření a kontrolování různých procesů, kde se využívá UV a viditelné světlo. Nejdůležitější parametry jsou uvedeny v tabulce 3.

Popis	Symbol	Hodnota	Jednotka
Vlnová délka maximální citlivosti	$\lambda_{Smax}$	440	nm
Spektrální rozsah citlivosti $S=1\%$ z $S_{max}$	$\lambda$	190-570	nm
Citlivostní plocha zářiče	A	1,2	mm
proud za tmy	$I_D$	10-30	pA
Spektrální citlivost	$S_\lambda$	0,17	A/W
doby náběžných a sestupných hran $RL=50\Omega$	$t_r, t_f$	1/20	us
Kapacita	$C_J$	300	pF
Ekvivalentní výkon šumu $\lambda = 440$	NEP	$1.1 \times 10^{-14}$	W.Hz <sup>-1/2</sup>
Detekční limit	$D^*$	$1.0 \times 10^{-12}$	W.Hz <sup>-1/2</sup>
výstupní proud $\lambda = 440$ $E_R = 1 \text{ mW/cm}^2$ $V_R = 0 \text{ V}$	$I_{Ph}$	1,55	uA

Tabulka 3: Parametry fotodiody EPD-440-0/1,45



Obrázek 15: závislost spektrální citlivosti na osvětlení

## 6.4 Senzory magnetického pole [5]

Dělíme je na několik skupin

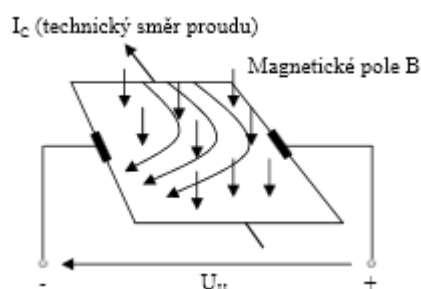
- induktivní senzory
- magnetorezistivní senzory
- hallovy senzory
- jazýčkové spínače

Nejdůležitější jsou hallovy senzory. Tyto jsou založeny na principu Hallova jevu. Pokud hallovou sondou prochází proud a je umístěna do magnetického pole tak, že jeho siločáry jsou kolmé k polovodičové destičce a tedy i ke směru protékajícího proudu, jsou elektrony, které destičkou procházejí, vlivem magnetického pole vychylovány. Síla, která elektrony vychyluje z přímého směru vždy k jedné straně destičky se nazývá Lorenzova síla.

$$F = Q \cdot (v \cdot B) \quad [N; C, m / s, T] \quad (14)$$

Kde: Q elektrický náboj  
V rychlost elektronů  
B indukce působícího magnetického pole

Vychýlením elektronů dochází ke změně rozložení nábojů na stranách destiček. Díky tomu mají destičky rozdílný potenciál a to se projeví na svorkách hallové sondy napětím  $U_H$ .



Obrázek 16: znázornění vzniku hallova napětí

Velikost Hallova napětí je dána vztahem:

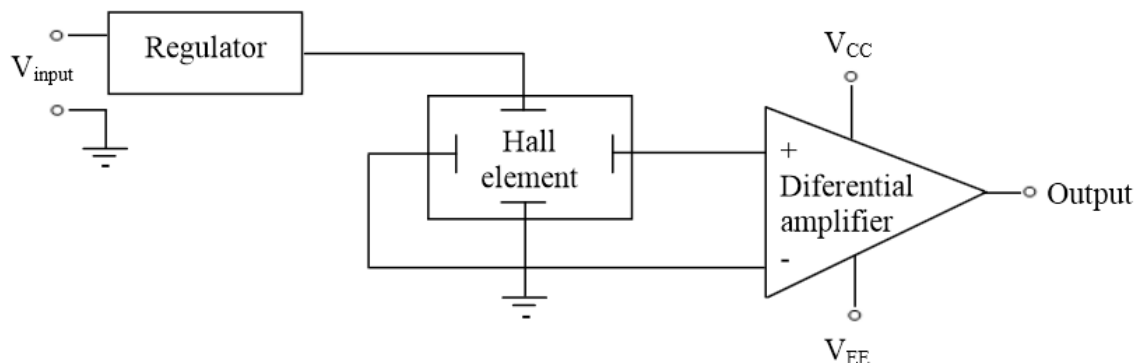
$$U_H = \frac{R_H}{d} \cdot I_C \cdot B \quad [V; m^3 / A_s, m, A, T] \quad (15)$$

Kde  $R_H$  Hallův činitel  
 $d$  tloušťka vrstvy polovodiče  
 $I_C$  proud procházející hallovou sondou  
 $B$  indukce magnetického pole

Hodnoty  $R_H$  a  $d$  jsou určeny přímo výrobcem. Uživatel tedy může měnit pouze proud  $I_C$  a velikost indukce magnetického pole  $B$ . Polarita Hallova napětí závisí na orientaci procházejícího proudu  $I_C$  a na směru vektoru magnetické indukce  $B$ .

### 6.4.1 Integrované hallovy senzory [5]

K použití polovodičové destičky jako senzoru magnetického pole, ji musíme doplnit příslušnou elektronikou viz. obr. 17. Pomocí této elektroniky Hallovo napětí zesílíme na požadovanou mez a také má za úkol regulaci a stabilizaci napájecího napětí, což je důležité ke generování konstantního proudu. Tento proud je základní podmínkou pro to, aby Hallovo napětí bylo závislé pouze na velikosti indukce magnetického pole.



Obrázek 17: koncepce integrovaného hallova senzoru:

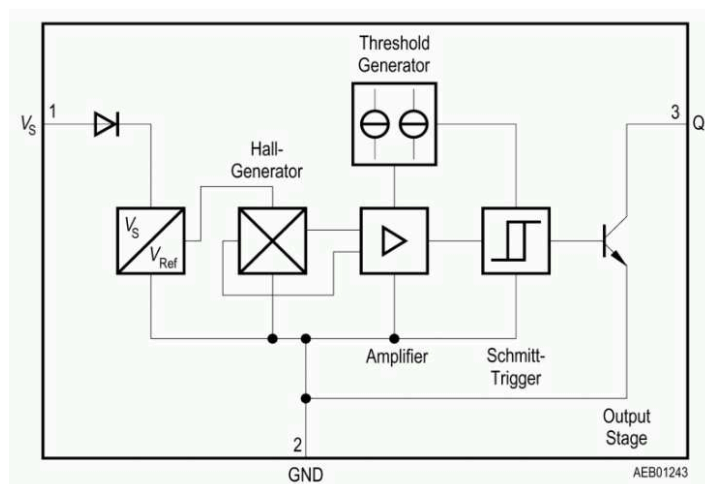
Hallovy senzory dělíme podle typu výstupu na senzory s analogovým a digitálním výstupem.

### 6.4.2 Hallův senzor TLE4905L

Pro kontrolování zavření víka byl zvolen Hallův senzor typu TLE4905L. Byl zvolen kvůli nízké pořizovací ceně a dobré dostupnosti.

Tento obvod se používá k detekci stejnosměrného magnetického pole. Tento senzor obsahuje spínaný binární výstup. K sepnutí dochází při magnetické indukci v rozmezí 7-18 mT a k rozepnutí stačí indukce o 5-16 mT. Senzor pracuje v širokém rozsahu napájecího napětí a to od 3,8V do 24V. Blokové schéma senzoru TLE4905L je uvedeno na obrázku 18.





Obrázek 18: Blokové schéma Hallový sondy TLE4905L

## 6.5 A/D převodník [1]

Analogově-číslicová převod můžeme rozdělit do tří fází.

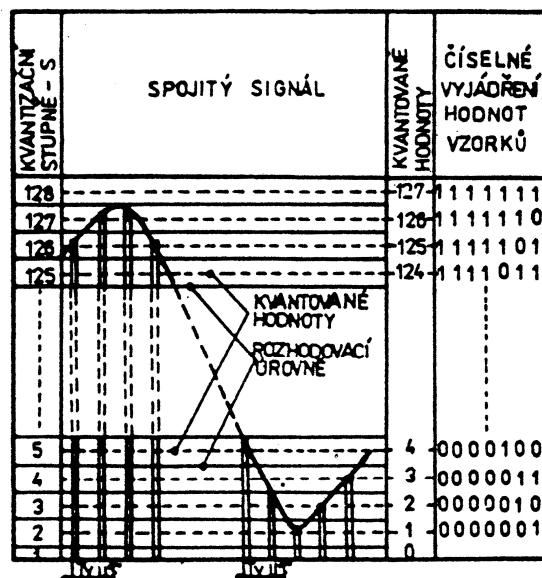
1. vzorkování
2. kvantování
3. kódování



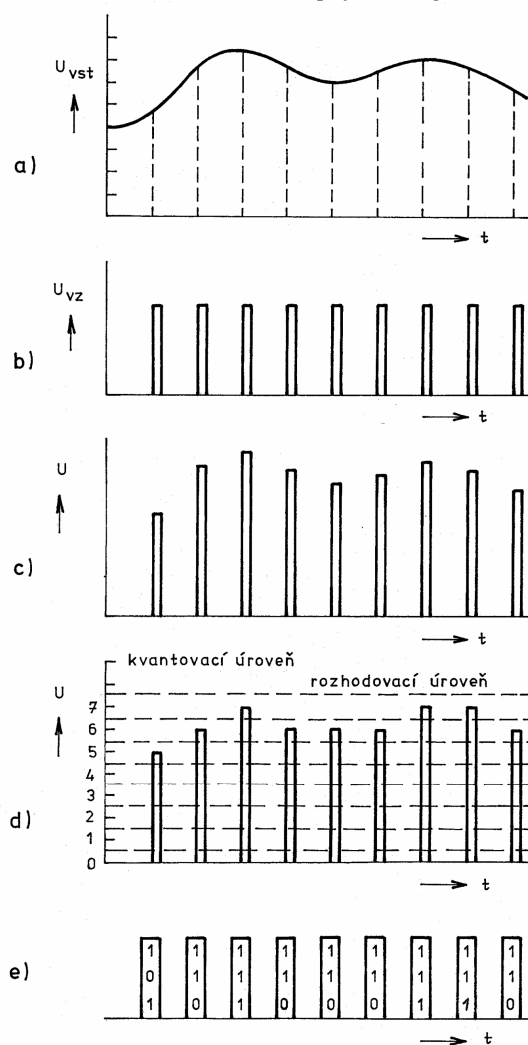
Obrázek 19: Znázornění fází A/D převodníku

Při vzorkování se pravidelně odebírají vzorky amplitudy analogového signálu. Vzorkování se musí provádět nejméně s dvojnásobným vzorkovacím kmitočtem v porovnání s nejvyšší kmitočtovou složkou analogového signálu. Získané vzorky jsou diskrétního charakteru, ale mohou stále nabývat nekonečně mnoha amplitudových hodnot v rozsahu analogového signálu. Abychom určili jejich pevnou hodnotu, musím použít druhou fázi – kvantování.

Mezi kvantovacími úrovněmi jsou rozhodovací úrovně, podle kterých se rozhoduje, zda hodnota vzorku bude přiřazena k nižší nebo vyšší kvantované úrovni. Počet rozhodovacích úrovní je  $2^n$  ( $n$  je počet bitů). Jako poslední se provede kódování, při kterém se kvantovaná úroveň vyjádří v určitém kódu, např. binárním.



Obrázek 20: Kvantování spojitého signálu



Obrázek 21: Znáznornění AD převodu

## 6.6 Mikroprocesor

### 6.6.1 Popis

Pokrok v integraci obvodů nám dovolil vytvoření nových součástek nazývaných mikropočítače.

Takovéto obvody mají na jednom čipu integrovány procesor (výpočetní jádro), paměti a jiné periferní obvody. Periferními obvody bývají zpravidla AD převodníky, komparátory, časovače, čítače atd....

Pomocí tohoto obvodu a pár pasivních součástek můžeme ovládat celou aplikaci.

Komunikace mezi periferiemi probíhá po různých sběrnících (I2C, 1-wire,...). Tím je zajištěna stavebnicová koncepce (může přidávat jednotlivé bloky bez nutnosti zasahovat do vnitřního zapojení). Nevýhoda takovéto komunikace spočívá v tom, že přístup na sběrnici má vždy jen jeden zdroj dat.

Výrobci je na trhu spousta (MAXIM, Analog-device,...) a cena mikrokontrolérů se může pohybovat od desítek korun až po tisíce.

### 6.6.2 Výběr MCU

Při výběru jsou důležité tyto parametry

- výpočetní výkon
- velikost programové a datové paměti
- počet vstupních a výstupních portů
- dostupnost vnitřních periferních obvodů
- dostupnost vývojového softwaru

### 6.6.3 MCU ATmega16

Mikroprocesor ATmega16 jako první z řady AVR umí komunikovat s JTAG rozhraním a program může být odladěn přímo v něm.

Další důvod proč, jsem zvolil mikrokontrolér od firmy Atmel, byl fakt, že tyto procesory lze programovat ve velmi příjemném prostředí AVR Studia 4., který využívá pro psaní kódu jazyk „C“, který je daleko přehlednější a příjemnější než klasické programování např. v jazyku ASSEMBLER. AVR Studio je volně stažitelné ze stránek společnosti Atmel.

**Další vlastnosti:**

- obsahuje čtyři 8bitové vstupně/výstupní porty
- 16kB paměť Flash
- 1kB paměť SRAM
- 512B paměť EEPROM
- Dva 8bitové čítače/časovače
- Čtyři PWM kanály
- 10bitový A/D převodník

## 7 Konstrukce a zapojení

### 7.1 Rozvržení osvitky v kufru a rozdělovací plech

Osvitka desek plošných spojů je umístěna v hliníkovém kufru o rozměrech 460x330x150mm. Její obsah byl vybrán a pěnová výstelka strhaná. Kufr je rozdělen uprostřed plechem, do kterého byly laserem vypáleny otvory. Celkový pohled na osvitku je na obr. 22.

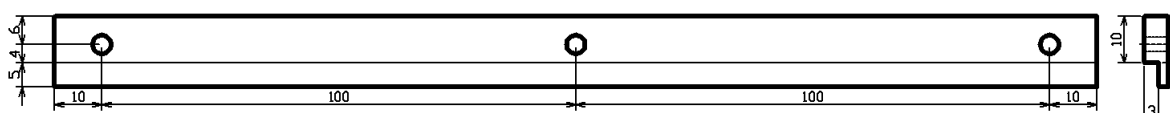


*Obrázek 22: celkový pohled na osvitku*

Jako rozdělovací plech byl použit nerez o tloušťce 2mm, kvůli jeho pevnosti. Osvitová plocha se nesmí v žádném místě prohýbat nebo jinak deformovat. Jeho rozměry jsou uvedeny na obrázku 24.

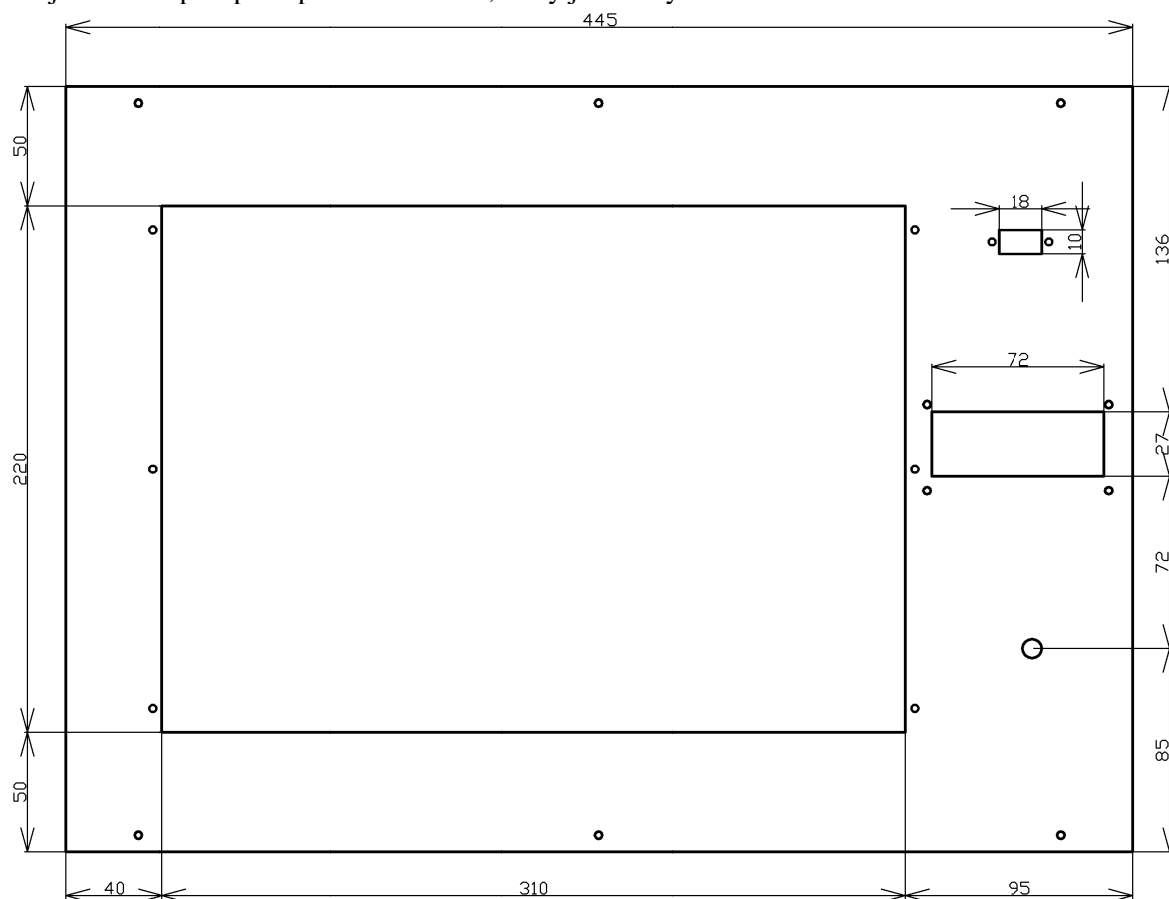
V otvoru 220x310mm je umístěno sklo, pod kterým jsou umístěny desky s LED diodami. Druhý otvor o rozměru 70x27mm je určen pro LCD displej 2x16 znaků. Třetí otvor slouží k připojení konektoru D-SUB 9pin, který slouží ke změně programu a připojení měřiče intenzity UV světla.

Sklo je k plechu přichyceno pomocí lišt, které byly vyfrézovány ze železa. Náčrt lišt je na obrázku 23. Kompletní výkresy jsou k dispozici v přílohách 11 a 12.



Obrázek 23: Náčrt lišt k uchycení skla

Sklo je k lištám přilepeno pomocí silikonu, který je odolný UV záření.

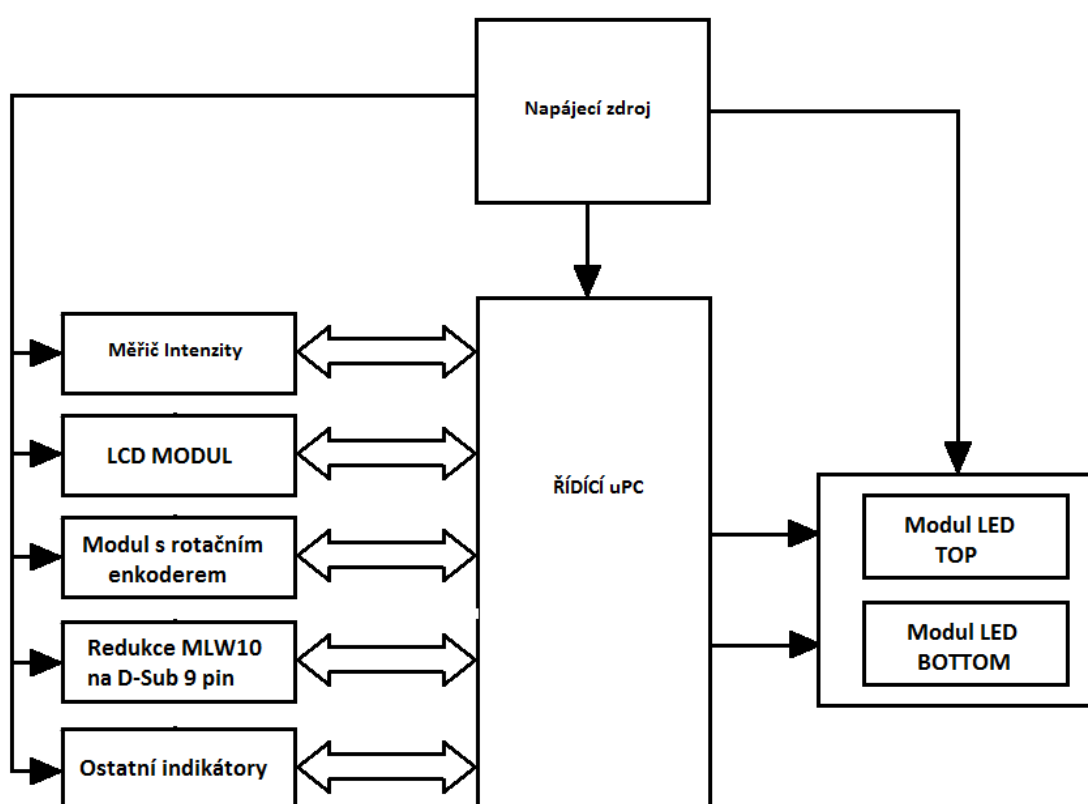


Obrázek 24: Náčrt rozdělovacího plechu

Napájecí konektory jsou vyvedeny ze zadní strany osvitky (viz. obr. 25). Černý je 0V a červený +20V. Černo-červená zdířka slouží pro připojení -12V, který je nutný pouze pro chod měřiče intenzity UV světla, proto byl vyveden z boku.



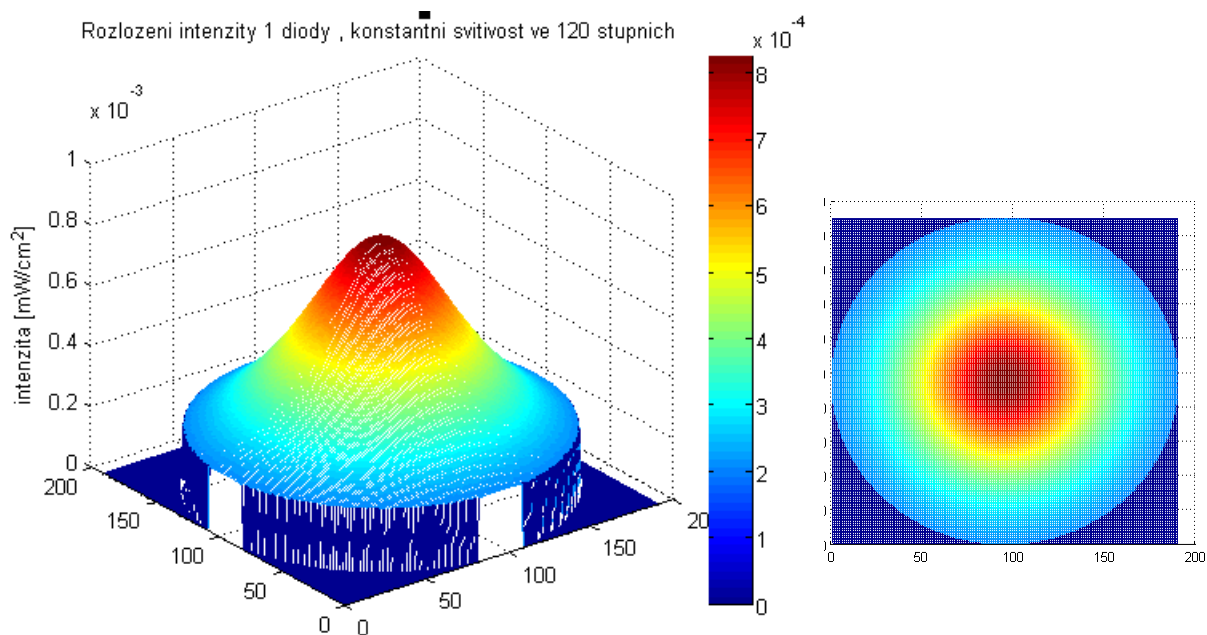
Obrázek 25: Napájecí konektory



Obrázek 26: Blokové schéma celého přístroje

## 7.2 Modul LED

Na rozmístění diod asi neexistuje žádný vzorec či návod, proto máme prakticky 2 možnosti. Buďto diody rozmístit chaoticky a doufat co se bude dít, nebo si vzdálenost od skla dopočítáme např. pomocí goniometrických funkcí a zvolením vzdáleností mezi diodami a sklem. Další důležitou vlastností co nás zajímá je úhel svitu diod. Čím větší vyzařovací úhel diod, tím méně diod spotřebujeme.



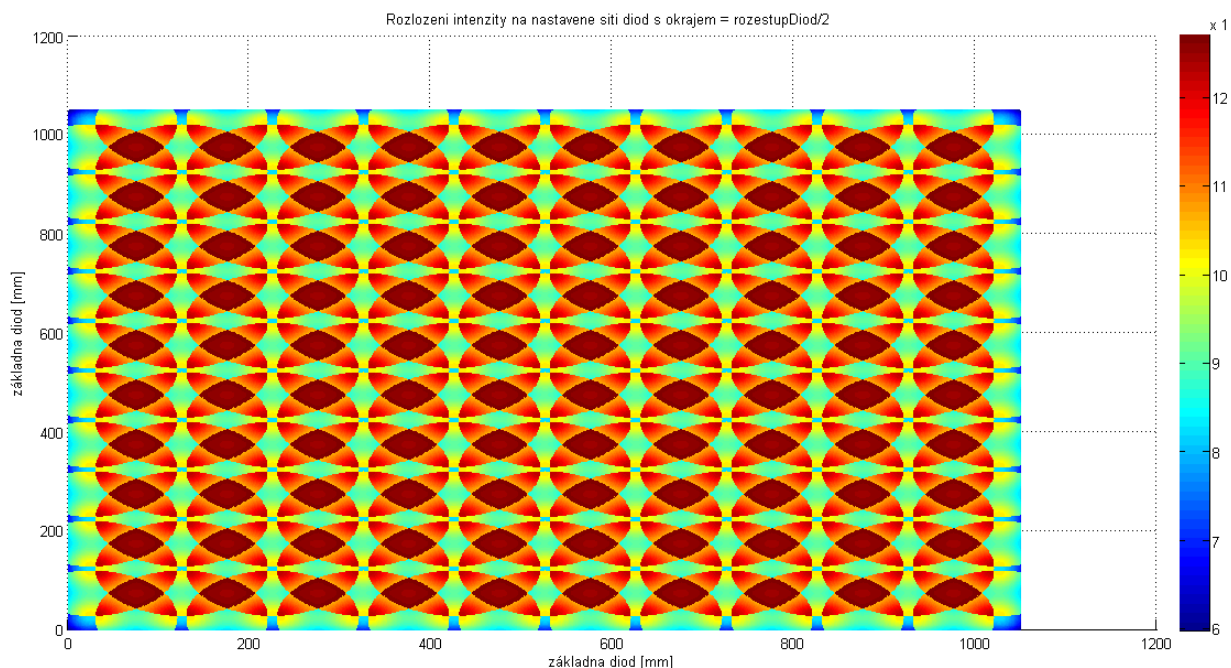
Obrázek 27: Znáznornění intenzity jedné LED diody

Na obrázku je vidět, že intenzita nad diodou je největší a čím více se od diody vzdalujeme, tím intenzita klesá. Osy x, y můžeme brát v tomto případě za jednotky vzdálenosti v milimetrech.

Pomocí programu MATLAB jsem vytvořil jednoduchý program, pomocí kterého můžu simulovat rozvržení intenzity UV světla na stínítku (sklu). Pomocí něho bych měl být schopen zvolit ideální rozmístění diod, aby intenzita UV světla byla rovnoměrně rozložená na ploše stínítka.

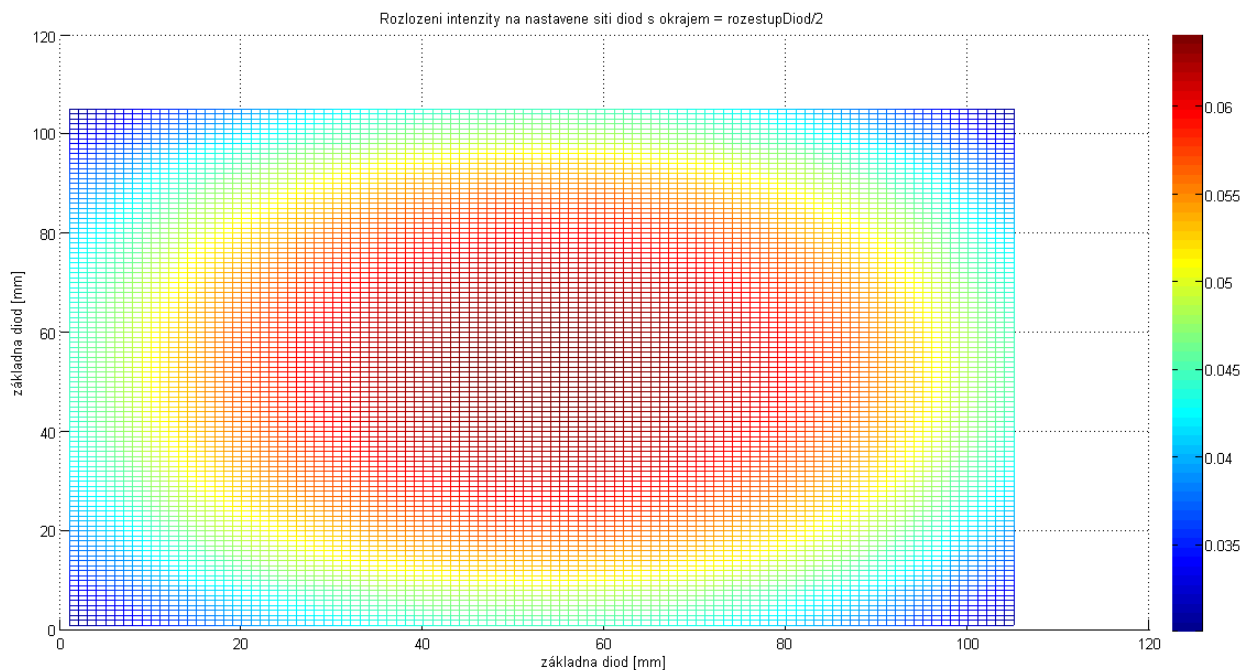
Pokud zvolím např. vzdálenost diod od stínítka 55mm a rozestup diod 100mm, zjistíme, že intenzita není ve všech místech stejná nebo podobná a proto tato možnost nepřipadá v úvahu (obr. 28.)

Simulovaná velikost osvitové plochy je matice diod (11x11), s různou vzdáleností diod od sebe.



Obrázek 28: Špatné rozmístění diod (místa se slabou intenzitou)

Pokud zvolíme jiný extrém, kdy budou LED diody vzdálené mezi sebou 1cm a vzdálenost od stínítka ponecháme stejnou (55mm) zjistíme, že intenzita uprostřed stínítka by byla obrovská, ale při okrajích velmi malá. Obr. 29.

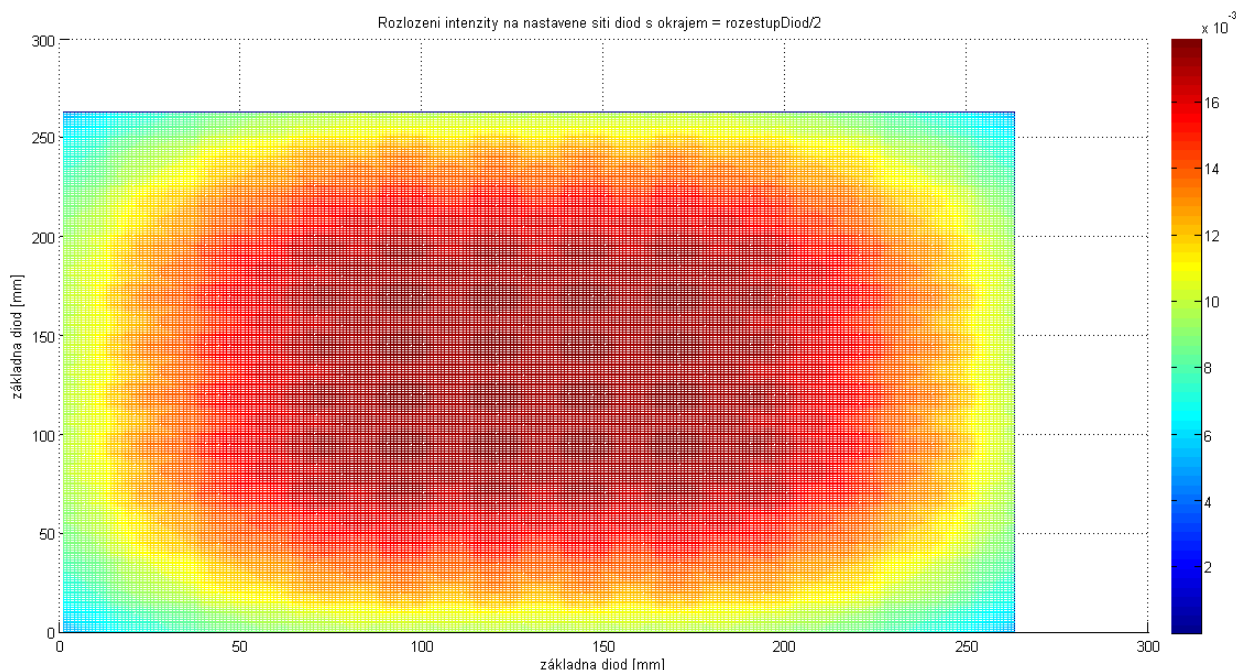


Obrázek 29: Střed stínítka přexponován

Proto musíme zvolit co nejoptimálnější vzdálenost diod. Ale zároveň musíme počítat i s tím, že kdybychom zvolili rozestup diod příliš velký, doba osvitu by se nám mohla prodloužit



třeba i na hodiny. Proto jsem pomocí mého programu a experimentu zvolil jako neoptimálnější rozmístění diod 25mm mezi sebou. (obr. 30)



Obrázek 30: optimální rozmístění LED diod

Z tohoto rozmístění je patrné, že zde jsou místa i s vyšší intenzitou UV světla. Toto je eliminováno běžným sklem o tloušťce 5mm, který má UV propustnost max. 90%. Abychom mohli přesně změřit a porovnat výsledky s MATLABem, museli bychom použít speciální křemičité sklo, které není běžně k sehnání a patří do skupiny velmi drahých skel.

### 7.3 Měřič intenzity



Obrázek 31: Blokové schéma měřiče intenzity

Měřená veličina je přiveden do bloku označen jako N/E, který neelektrickou veličinu (v našem případě intenzitu UV světla) převede na napětí.

V bloku Úprava signálu, se měřená veličina zesílí na požadovanou velikost, která je následně převedena do digitální formy AD převodníkem a vyhodnocena mikrokontrolérem.

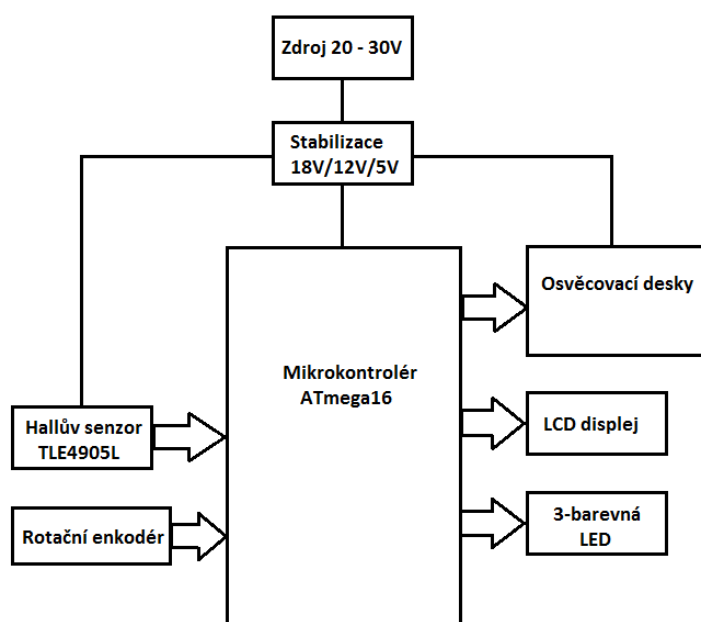
Schéma měřiče je uvedeno v příloze 6. Na výstupu fotodiody EPD440-0/1.45 je zapojen precizní operační zesilovač OPA129 jako převodník proudu na napětí. Tento zesilovač je doplněn o zapojení s trimrem, pomocí kterého se dá v malém rozmezí nastavit offset (pár uV). Toto napětí je přivedeno na vstup AD převodníku AD7687 přes RC filtr. AD převodník je 16ti bitový doplněn o přesnou napěťovou 5V referenci ADR435. Aby nedocházelo k rušení, jsou země rozděleny od napájecí části a měřicí, které jsou propojeny v jednom úzkém bodě na DPS pomocí rezistoru s hodnotou 0R. AD převodník je schopen měřit napětí s rozlišením 0,0000762V až do maximální hodnot 5V.

Měřič byl umístěn do plechové krabičky o rozměrech 43x58x18mm.



Obrázek 32: Měřič intenzity UV světla

## 7.4 Zapojení časovače



Obrázek 33: Blokové schéma časovače

Na obrázku 33. je vidět blokové schéma základní desky měřiče. Skládá se z několika částí. Napájecího zdroje 20 – 30V, který je stabilizován na potřebné napětí. Dalším blokem je rotační enkodér, který slouží k ovládání osvitky.

Blok s hallovou sondou hlídá zavření víka, jako výstup je použit LCD displej a 3-barevná LED.

Základní deska obsahuje 4 relé, které spínají moduly s UV LED diodami.

- první relé spíná malý rozměr desky
- druhým se sepne větší rozměr desky

- třetí relé spíná poslední největší desku
- čtvrté relé má za úkol spínat oboustranný osvit

Jelikož jsou ovládací a indikační prvky osvitky napevno instalovány v nerezovém plechu, rozhodl jsem se, že bude vytvořena jedna řídicí jednotka (hlavní deska) ke které budou připojovány jednotlivé periferie pomocí kabelů.

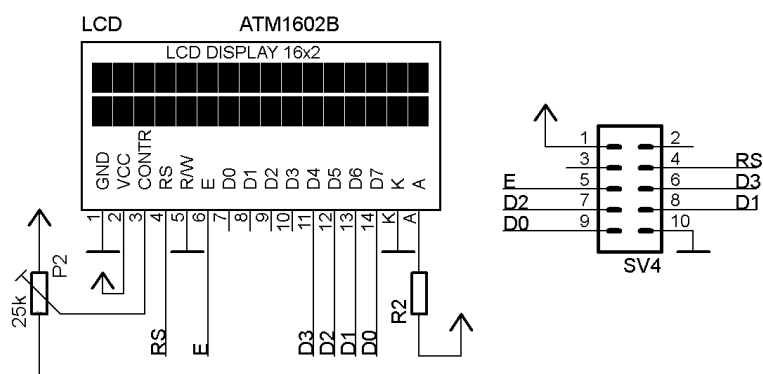
#### Obsažené jsou 3 typy stabilizátorů.

- 5V stabilizátor napájí řídicí elektroniku a relé.
- 12V stabilizátor slouží k rozložení ztrát (velký úbytek napětí na 5V stabilizátoru by způsoboval velké ztráty v tomto stabilizátoru) a také slouží k napájení větráku, který je umístěn na chladič, který zajišťuje chlazení stabilizátorů.
- 18V stabilizátor slouží k napájení desek s UV LED diodami

Konektor určený pro LCD slouží pro připojení LCD displeje. Zbývající dva konektory slouží k připojení hallové sondy a tříbarevné led diody.

## 7.5 LCD modul

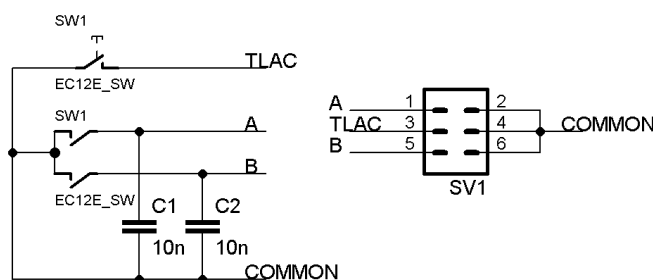
Jedná se o zapojení LCD, které komunikuje pomocí 4 bitové komunikace, doplněný o trimr, pomocí kterého je nastaven kontrast. Rezistor R2 slouží k nastavení podsvícení LCD.



Obrázek 34: Zapojení LCD modulu

## 7.6 Modul s rotačním enkodérem

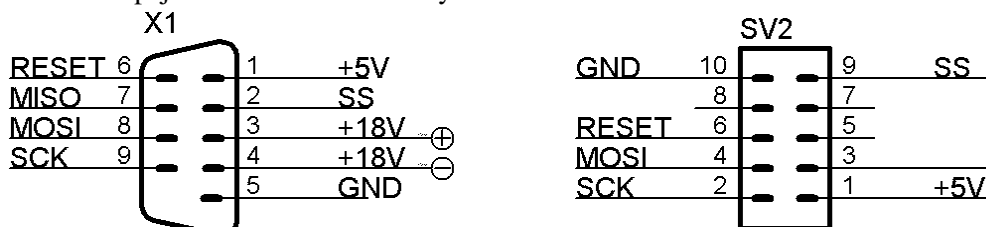
Jako rotační enkodér je použit enkodér s tlačítkem. Výstup enkodéru je opatřen 10nF kondenzátory, které eliminují zámkity a tím přeskakování hodnot při vybírání v menu.



Obrázek 35: Modul s rotačním enkodérem

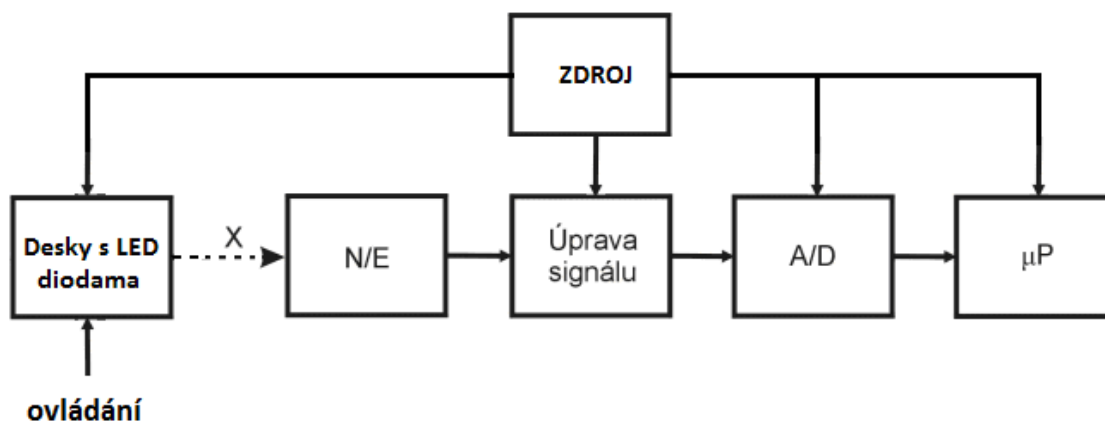
## 7.7 Redukce konektoru MLW10 na D-SUB 9-PIN

Tento modul je určen pro připojení programátoru a změně programu a také slouží k připojení měřiče intenzity UV světla. Konektor D-SUB 9-pin je doplněn o napájení  $\pm 18V$ , které slouží k napájení UV měřiče intenzity.



Obrázek 36: redukce z konektoru MLW10 na D-SUB 9 pin

## 8 Měřicí řetězec a řízení osvětlu



Obrázek 37: příklad měření intenzity UV světla

### 8.1 Měření na jedné LED diodě

Jelikož jsem nechtěl mikrokontrolér zahrát výpočtem intenzity UV světla, nechal jsem po sériové lince posílat pouze napětí, které generovala fotodiody. Toto napětí bylo nutné vždy přepočítat na hodnotu intenzity.

#### Výpočet intenzity UV světla z naměřeného napětí

Naměřená hodnota např. 70mV

$$U = 70mV$$

$$I = \frac{U}{R_F} = \frac{70 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^6} = 7 \cdot 10^{-9} A \quad (16)$$

Kde  $R_F$  je hodnota zpětnovazebního rezistoru převodníku proudu na napětí. Když známe proud generovaný diodou, tak intenzitu UV světla dopočteme trojčlenkou, která vychází z toho, že dioda generuje proud 1,55uA při osvětlení o intenzitě 1mW/cm<sup>2</sup>. Tento údaj jsme vyčetli z datasheetu fotodiody.

$$1mW / cm^2 \dots\dots\dots 1,55\mu A$$

$$E_x = ? \dots\dots\dots I$$

(17)

$$E_x = \frac{I}{1,55 \cdot 10^{-6}}$$

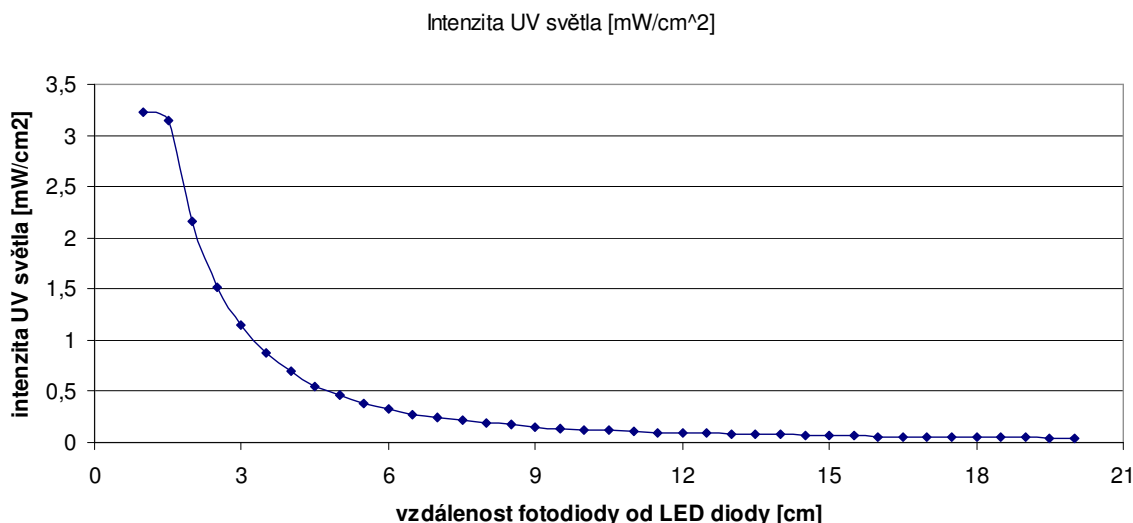
$$E_x = \frac{7 \cdot 10^{-9}}{1,55 \cdot 10^{-6}} = 0,00451mW / cm^2$$

Měření spočívalo v měření proudu generovaného fotodiodou, osvětlovanou jednou UV LED diodou typu: OSV4YLS1C1A, a její parametry byly popsány výše.

Grafem by podle teorie měla být exponenciála, protože intenzita UV světla klesá s druhou mocninou vzdálenosti.

vzdálenost [cm]	napětí [mV]	Intenzita UV světla [mW/cm^2]	vzdálenost [cm]	napětí [mV]	Intenzita UV světla [mW/cm^2]
20	70	0,04516129	10	201	0,129677419
19,5	72	0,046451613	9,5	220	0,141935484
19	75	0,048387097	9	239	0,154193548
18,5	78	0,050322581	8,5	267	0,172258065
18	82	0,052903226	8	297	0,191612903
17,5	84	0,054193548	7,5	334	0,215483871
17	87	0,056129032	7	381	0,245806452
16,5	91	0,058709677	6,5	428	0,276129032
16	95	0,061290323	6	510	0,329032258
15,5	100	0,064516129	5,5	602	0,388387097
15	105	0,067741935	5	718	0,463225806
14,5	112	0,072258065	4,5	855	0,551612903
14	120	0,077419355	4	1087	0,701290323
13,5	123	0,079354839	3,5	1365	0,880645161
13	130	0,083870968	3	1773	1,143870968
12,5	139	0,089677419	2,5	2351	1,516774194
12	147	0,09483871	2	3350	2,161290323
11,5	157	0,101290323	1,5	4878	3,147096774
11	173	0,111612903	1	4999	3,22516129
10,5	187	0,120645161			

Tabulka 4: Naměřené a vypočtené hodnoty



Obrázek 38: závislost výstupního proudu fotodiody na osvětlení

Z obrázku 38 plyne, že graf odpovídá teorii. Neboli, že intenzita UV světla opravdu klesá s druhou mocninou vzdálenosti. Přitom největší měřitelná intenzita byla ve vzdálenosti 1cm. Potom už byl výstup operačního zesilovače mimo rozsah AD převodníku, který je schopen měřit až po napětí  $U_{REF}$ .

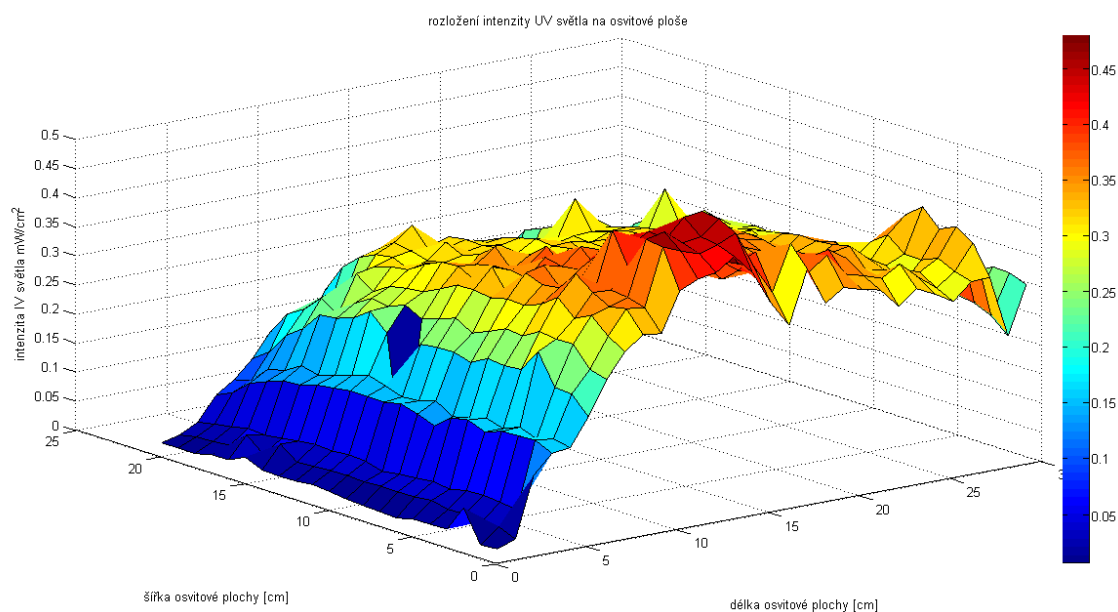
## 8.2 Měření na celé ploše osvitky

Zde při měření byla osvitová plocha rozkouskována na síť 1x1cm a v každém tomto bodě byla měřena intenzita UV světla a zaznamenávána do tabulky. Tato tabulka byla zpracována v programu MATLAB.

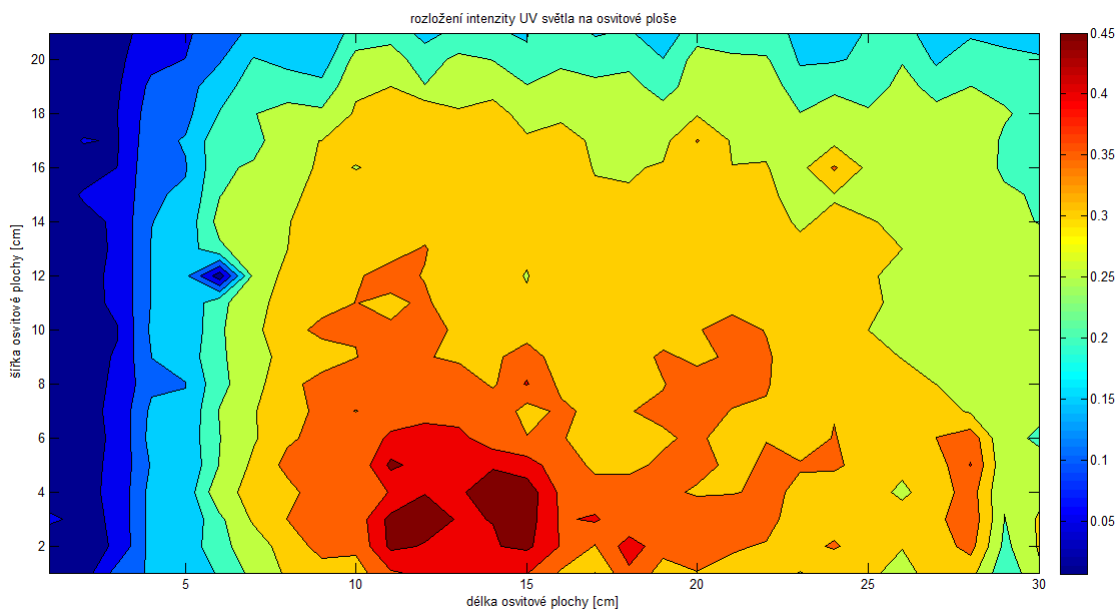
Hodnoty i zde byly zaznamenávány v mV a v excelu přepočítány na hodnoty intenzity. Převod je stejný jako v minulém měření. Tabulku s naměřenými hodnotami je uvedena v příloze č. 9. Tabulka v příloze č. 10 obsahuje hodnoty převedené z hodnot mV na intenzitu  $mW/cm^2$ .

Zde je měření značně ovlivněno i čistotou povrchu skla osvitové plochy, protože např. mastné skvrny mohou způsobovat různé lomy světla, proto je toto měření spíše orientační.

Na obrázcích 39 a 40 je zobrazena intenzita měřena na mé osvitové ploše. Na obrázku 38 je vidět modrý náběh. Ten je způsoben tím, že v osvitce není přítomná doplňující deska s UV LED diodami do rozměru A4.



Obrázek 39: Intenzita UV světla na osvitové ploše



Obrázek 40: rozložení intenzity UV světla na skleněné ploše

### 8.3 Pohlcování UV světla sklem

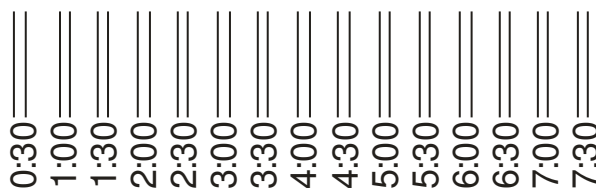
Při tomto měření bylo sklo vkládáno mezi fotodiodu a UV LED diodu. Celkem bylo provedeno 5 měření a vypočten aritmetický průměr z naměřených hodnot. Výsledek nám udává, jak se změní intenzita UV světla na ploše v procentech (viz. tabulka). Výsledné pohlcování intenzity činí přibližně 9,5%. A z naměřených hodnot vyplývá, že sklo je jakýsi konstantní filtr.

Rozdíl intenzit se sklem a bez skla					
Intenzita bez skla [mW/cm <sup>2</sup> ]	2177	864	524	344	211
Intenzita se sklem [mW/cm <sup>2</sup> ]	1975	778	476	312	191
Rozdíl [%]	9,28	9,95	9,16	9,3	9,48
průměrná hodnota [%]	9,43				

Tabulka 5: Měření rozdílů intenzit

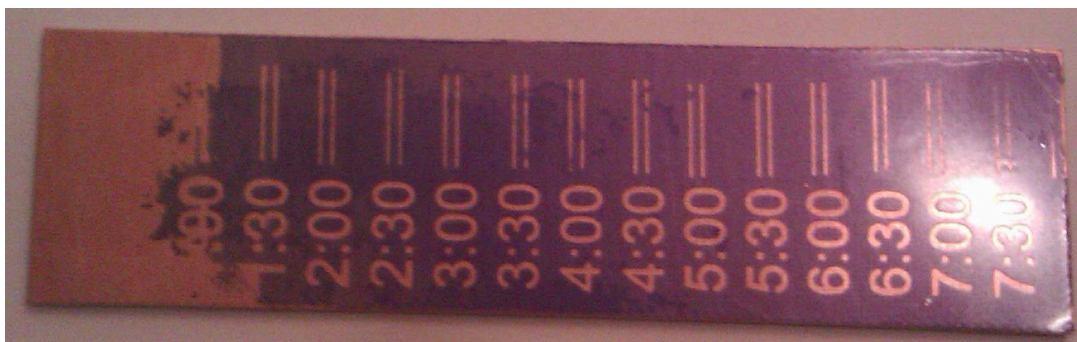
## 8.4 Délka osvitu DPS

Při měření optimální doby osvitů byla zpracována testovací matrice, která informuje o osvětlení DPS. Byly doplněny čáry o tloušťce 0,2mm.



Obrázek 41: Předloha testovací DPS

K tomuto testu byla použita DPS s naneseným negativním fotorezistem. Výsledek měření je takový, že do doby 1,5 minuty, byl osvit nejhorší. Fotocitlivá vrstva se ve vývojce zcela smyla. Od tohoto času až po čas 6,5 minut byl osvit ideální. Od času 6,5 minuty a dále se už tenké čáry přesvítily a vývojka je nesmyla.



Obrázek 42: Výsledek různých dob osvitů

Abychom zjistili potřebnou energii k osvitu DPS v čase 2,5 minut, je potřeba znát zářivý tok, který představuje energii vyzářenou zdrojem za jednotku času. A je dán vztahem:

$$\Phi_e = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad [\Phi_e] = J \cdot s^{-1} = W \quad (18)$$

Kde:  $\Delta E$  je energie vyzářená zdrojem

$$\Delta E = 0,324532 \text{ mW/cm}^2 \text{ (průměrná hodnota z naměřených hodnot na celé osvitce)}$$

$$\Delta t = 150 \text{ s (2,5 minuty)}$$

$$\Phi_e = \frac{0,000324532}{150} = 2,163 \cdot 10^{-6} \text{ W/cm}^2$$

K osvitu DPS na obrázku 42 bylo potřeba energie o velikosti  $2,163 \cdot 10^{-6} \text{ W/cm}^2$

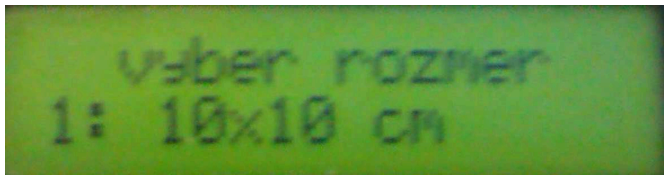


## 9 Ovládání osvitky

Program byl napsán jazyku C ve vývojovém prostředí AVR Studio 4.

Při připojení napájení, je zobrazen dotaz, jaký rozměr DPS chceme osvětlovat. Máme možnost si vybrat ze 3 velikostí

- 1: 10x10 cm
- 2: 21x10 cm
- 3: 30x21 cm



Obrázek 43: ukázka dotazu na výběr DPS

Po vybrání vhodné velikosti potvrdíme stiskem tlačítka a následuje vybrání, zde chceme osvětlovat jednostrannou nebo oboustrannou DPS.



Obrázek 44: Výběr oboustranné DPS

Potvrdíme stiskem tlačítka a dostáváme s k nastavení času. Program má už přednastaven čas na hodnotu 00:02:30, tato doba se mi osvědčila jako nejlepší při osvětlování DPS s negativní vrstvou.

A otáčením enkodéru tento čas můžeme ještě upravovat.



Obrázek 45: Nastavení času

Po nastavení požadovaného času, nás program vyzve k uzavření víka a začne osvětlovat.

Po celou dobu nás o činnosti osvitky informuje LED dioda na čele kufru. Modrá barva indikuje nastavování parametrů. Červená otevření víka a zelená svítí během osvitu.

Konec osvitu poznáme, že indikační LED změnila barvu ze zelené na modrou. Tímto se program restartuje. A můžeme začít zadávat nové parametry.

Pokud se stane, že zadáme nějaký parametr osvitu špatně, musíme se proklikat až k hlášce, že máme uzavřít víko. Zde už jen stačí stisknout znova tlačítko a program se restartuje.

## 10 Závěr

Mým cílem v bakalářské práci bylo zkonstruovat funkční zařízení k osvětlování desek plošných spojů.

Zařízení umožňuje osvětlování DPS o rozměrech 220x220mm. Sice celkový rozměr byl zadán na formát A4, ale deska pro připevnění LED diod po 4 měsících ještě nedorazila. Ale jelikož je osvitka postavena jako lego, tento modul se dá kdykoli přidat.

Měření pomocí měřiče intenzity UV světla je nutno brát jako orientační, jelikož nebyla provedena žádná kalibrace. Použití externího AD převodníku (AD7687) jsem zvýšil přesnost celého zařízení. Zapojení obsahuje minimum součástek.

Možnost, jak toto zařízení vylepšit spočívá v kalibraci AD převodníku.

S ohledem na možnost změny obslužného programu mikroprocesory byl do osvitové plochy umístěn konektor, sloužící k připojení programátoru, bez nutnosti rozebrání zařízení.

## 11 Použitá literatura

- [1] DIVIŠ, Michal. *Luxmetr řízený mikroprocesorem* [online]. VUT Brno, 2011 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: [http://www.ieee.cz/mtt/soutez05/prace/divis/Diplomka\\_V100\\_360dpi.pdf#page=1&zoom=auto,0,800](http://www.ieee.cz/mtt/soutez05/prace/divis/Diplomka_V100_360dpi.pdf#page=1&zoom=auto,0,800). Diplomová. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Václav Michálek, CSc.
- [2] HRBÁČEK, Michal. *Luxmetr* [online]. Brno, 2012 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=53168](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53168). Bakalářská. VUT Brno. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Rozman, CSc.
- [3] ZORZANO, María-Paz, Martín-Soler JAVIER a Gómez-Elvira JAVIER. UV Photodiodes Response to Non-Normal, Non-Colimated and Diffusive Sources of Irradiance. *UV Photodiodes Response to Non-Normal, Non-Colimated and Diffusive Sources of Irradiance* [online]. 2011, č. 10, s. 23 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: [http://cdn.intechopen.com/pdfs/18836/InTech-Uv\\_photodiodes\\_response\\_to\\_non\\_normal\\_non\\_colimated\\_and\\_diffusive\\_sources\\_of\\_irradiance.pdf](http://cdn.intechopen.com/pdfs/18836/InTech-Uv_photodiodes_response_to_non_normal_non_colimated_and_diffusive_sources_of_irradiance.pdf)
- [4] PATÁK, Pavel. V YSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY FAKULTA ELEKTROTECHNICKÝ A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS TETRIS 3D – VYTVOŘENÝ POMOCÍ MATLABU Z LED DIOD [online]. Brno, 2010 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/16164/Bakal%C3%A1%C5%99sk%C3%A1%20pr%C3%A1ce.pdf?sequence=1>. Bakalářská. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Radek Šebela.
- [5] NETÁHLO, Tomáš. *Cyklopočítač s měřičem frekvence* [online]. 2010, Brno [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/16158/Bakal%C3%A1%C5%99sk%C3%A1%20pr%C3%A1ce.pdf?sequence=1>. Bakalářská. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Jiří Hermány.
- [6] KOSTA, Radek. *Upínací přípravek pro recyklaci PC desek* [online]. Zlín, 2009 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: [http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/10699/kostka\\_2009\\_bp.pdf?sequence=1](http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/10699/kostka_2009_bp.pdf?sequence=1). Bakalářská. UTB Zlín. Vedoucí práce Ing. Milan Žaludek, Ph.D.

[7] Použití fotodiod a fototranzistorů, měření zvlnění osvětlení. *Použití fotodiod a fototranzistorů, měření zvlnění osvětlení* [online]. 2005, s. 6 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: [http://measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A0M38OSE/Fototranz\\_Fotodio dy\\_obvody\\_2.pdf](http://measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A0M38OSE/Fototranz_Fotodio dy_obvody_2.pdf)

[8] ABEL, Martin a Radislav ŠMÍD. Plošné spoje se SMD: návrh a konstrukce. 1. vyd. Pardubice: Nakladatelství Platan, 2000, 218 s. Inspirace konstruktérům. ISBN 80-902-7332-7.

[9] MANN, Burkhard a Radislav ŠMÍD. [i]C pro mikrokontroléry: ANSI-C, kompilátory C, spojovací programy - linkery, práce s ATMELE AVR a MSC-51, příklady programování v jazyce C, nástroje pro programování, tipy a triky.[/i] Vyd. 1. Praha: BEN, 2003, 279 s. Inspirace konstruktérům. ISBN 80-730-0077-6.

## 12 Seznam obrázků

OBRÁZEK 1: UKÁZKA DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ .....	8
OBRÁZEK 2: MATERIÁLY K VÝROBĚ DPS .....	9
OBRÁZEK 3: PŘEDLOHA DPS NEGATIV OBRÁZEK 4: PŘEDLOHA DPS POSITIV .....	11
OBRÁZEK 5: SCHÉMA DIODY .....	12
OBRÁZEK 6: VIDITELNÉ SPEKTRUM LED DIOD .....	12
OBRÁZEK 7: SMĚROVOST JEDNÉ DIODY .....	14
OBRÁZEK 8: FOTODIODA .....	14
OBRÁZEK 9: ENERGETICKÝ PÁSOVÝ DIAGRAM PŘECHODU PN .....	15
OBRÁZEK 10: PŘECHODOVÁ CHARAKTERISTIKA DETEKTORŮ .....	18
OBRÁZEK 11: PŘECHODOVÁ VA CHARAKTERISTIKA FOTODIODY .....	19
OBRÁZEK 12: ZNÁZORNĚNÍ PLENÁRNÍHO PN PŘECHODU .....	19
OBRÁZEK 13: NÁHRADNÍ SCHÉMA FOTODIODY .....	20
OBRÁZEK 14: PRACOVNÍ REŽIMY FOTODIODY .....	20
OBRÁZEK 15: ZÁVISLOST SPEKTRÁLNÍ CITLIVOSTI NA OSVĚTLENÍ .....	22
OBRÁZEK 16: ZNÁZORNĚNÍ VZNIKU HALLOVA NAPĚTÍ .....	22
OBRÁZEK 17: KONCEPCE INTEGROVANÉHO HALLOVA SENZORU: .....	23
OBRÁZEK 18: BLOKOVÉ SCHÉMA HALLOVY SONDY TLE4905L .....	24
OBRÁZEK 19: ZNÁZORNĚNÍ FÁZÍ A/D PŘEVODNÍKU .....	24
OBRÁZEK 20: KVANTOVÁNÍ SPOJITÉHO SIGNÁLU .....	25
OBRÁZEK 21: ZNÁZORNĚNÍ AD PŘEVODU .....	25
OBRÁZEK 22: CELKOVÝ POHLED NA OSVITKU .....	27
OBRÁZEK 23: NÁČRT LIŠT K UCHYCENÍ SKLA .....	28
OBRÁZEK 24: NÁČRT ROZDĚLOVACÍHO PLECHU .....	28
OBRÁZEK 25: NAPÁJECÍ KONEKTORY .....	29
OBRÁZEK 26: BLOKOVÉ SCHÉMA CELÉHO PŘÍSTROJE .....	29
OBRÁZEK 27: ZNÁZORNĚNÍ INTENZITY JEDNÉ LED DIODY .....	30
OBRÁZEK 28: ŠPATNÉ ROZMÍSTĚNÍ DIOD (MÍSTO SE SLABOU INTENZITOU) .....	31
OBRÁZEK 29: STŘED STÍNÍTKA PŘEEXPOZOVÁN .....	31
OBRÁZEK 30: OPTIMÁLNÍ ROZMÍSTĚNÍ LED DIOD .....	32
OBRÁZEK 31: BLOKOVÉ SCHÉMA MĚŘIČE INTENZITY .....	32
OBRÁZEK 32: MĚŘIČ INTENZITY UV SVĚTLA .....	33
OBRÁZEK 33: BLOKOVÉ SCHÉMA ČASOVAČE .....	33
OBRÁZEK 34: ZAPOJENÍ LCD MODULU .....	34
OBRÁZEK 35: MODUL S ROTAČNÍM ENKODÉREM .....	34
OBRÁZEK 36: REDUKCE Z KONEKTORU MLW10 NA D-SUB 9 PIN .....	35
OBRÁZEK 37: PŘÍKLAD MĚŘENÍ INTENZITY UV SVĚTLA .....	35
OBRÁZEK 38: ZÁVISLOST VÝSTUPNÍHO PROUDU FOTODIODY NA OSVĚTLENÍ .....	37
OBRÁZEK 39: INTENZITA UV SVĚTLA NA OSVITOVÉ PLOŠE .....	38
OBRÁZEK 40: ROZLOŽENÍ INTENZITY UV SVĚTLA NA SKLENĚNÉ PLOŠE .....	38

OBRÁZEK 41: PŘEDLOHA TESTOVACÍ DPS .....	39
OBRÁZEK 42: VÝSLEDEK RŮZNÝCH DOB OSVITU.....	39
OBRÁZEK 43: UKÁZKA DOTAZU NA VÝBĚR DPS.....	40
OBRÁZEK 44: VÝBĚR OBOUSTRANNÉ DPS .....	40
OBRÁZEK 45: NASTAVENÍ ČASU .....	40

## 13 Seznam tabulek

TABULKA 1 - ZÁKLADNÍ MATERIÁLY A VLNOVÉ DÉLKY LED DIOD .....	13
TABULKA 2: PŘEHLED ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ.....	17
TABULKA 3: PARAMETRY FOTODIODY EPD-440-0/1,45.....	22
TABULKA 4: NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY .....	36
TABULKA 5:MĚŘENÍ ROZDÍLŮ INTENZIT .....	39

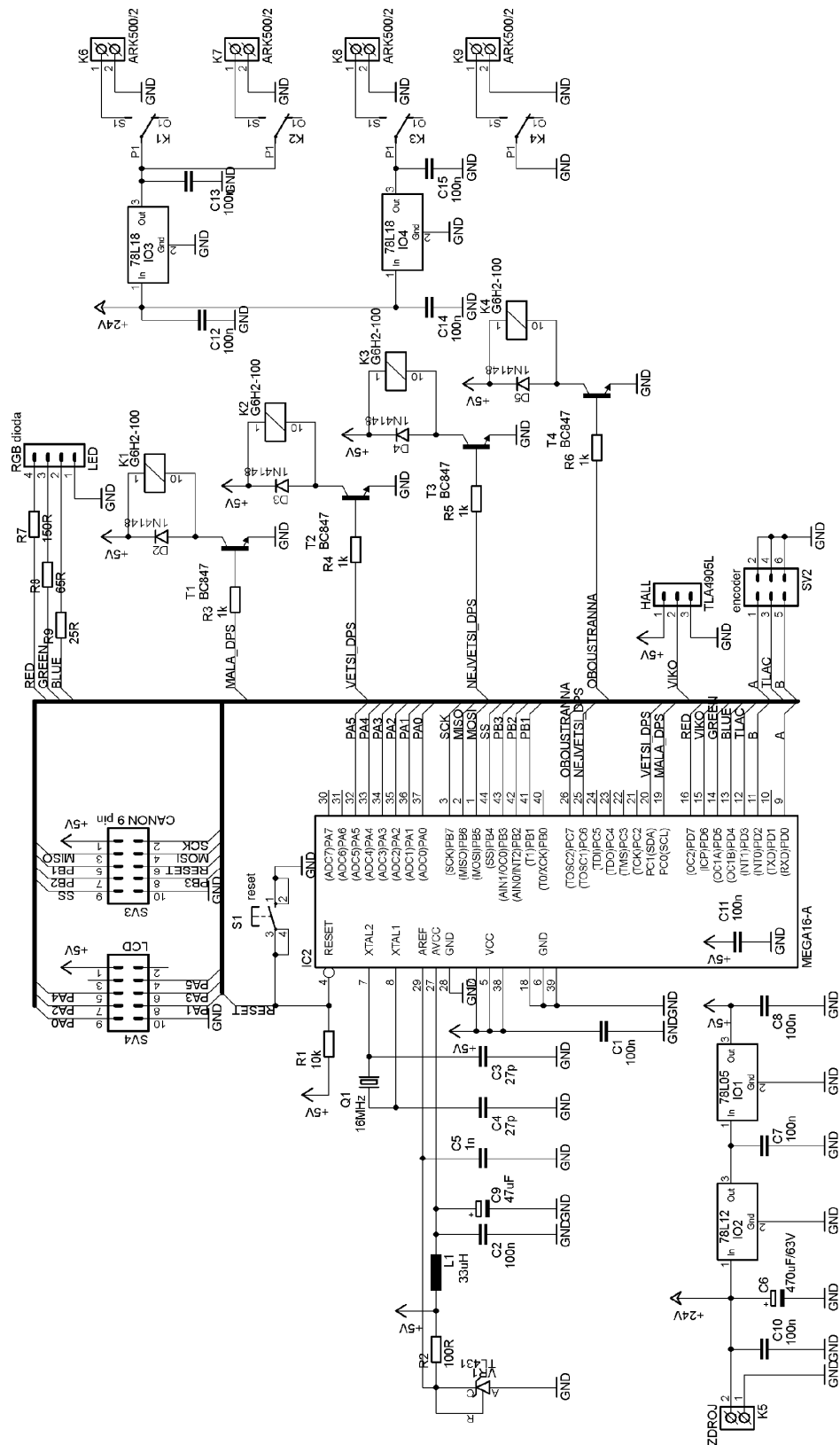
## 14 Seznam příloh

Příloha 1: Schéma základní desky
Příloha 2: Seznam součástek
Příloha 3: Osazení DPS základní desky (TOP + BOTTOM)
Příloha 4: Motiv DPS základní desky (TOP + BOTTOM)
Příloha 5: Schéma měřiče intenzity UV světla
Příloha 6: seznam součástek (TOP + BOTTOM)
Příloha 7: Osazení DPS měřiče součástek (TOP + BOTTOM)
Příloha 8: Motiv DPS měřiče součástek
Příloha 9: Tabulka naměřených hodnot pro celou osvitku.
Příloha 10: Tabulka hodnot Intenzit pro celou osvitku
Příloha 11: Výkres rozdělovacího plechu
Příloha 12: Výkres pacek pro uchycení skla

## 15 Obsah přiloženého CD:

Text diplomové práce
Katalogové listy obvodů
Programy pro MCU
Desky a schémata v programu EAGLE 6.1 Freeware
Programy pro výpočet v MATLABU
Naměřené hodnoty v tabulkách (excel)
Výkres ve formátu .dwg (autoCad 2008)

## Příloha 1:

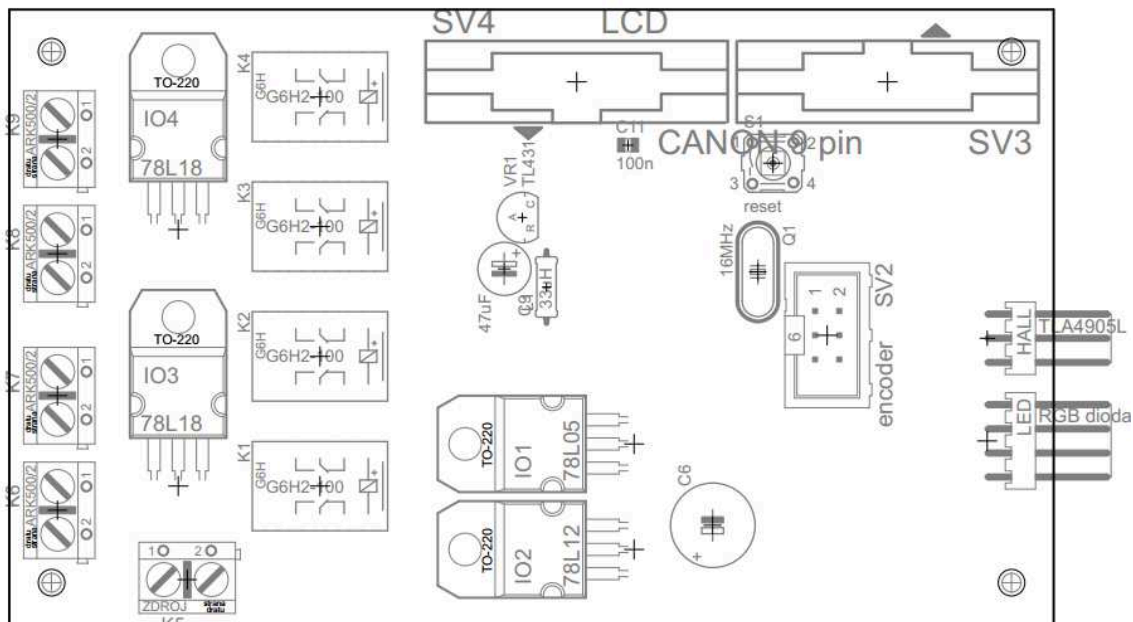


## Příloha 2:

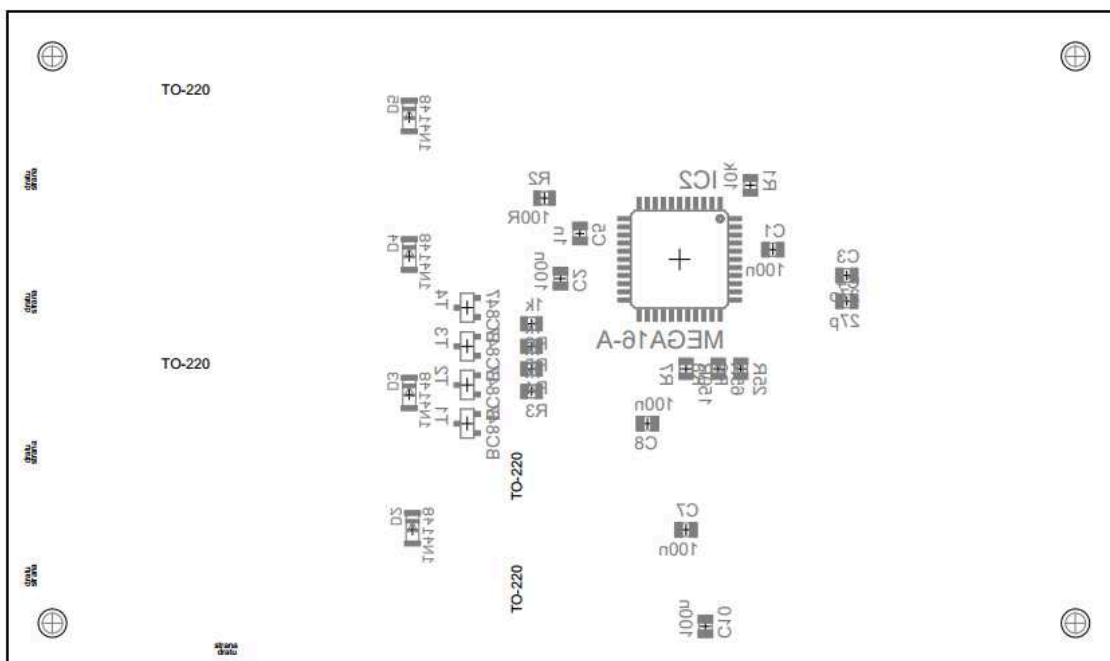
Part	Value		
C1	100n	T1	BC847
C2	100n	T2	BC847
C3	27p	T3	BC847
C4	27p	T4	BC847
C5	1n	VR1	TL431
C6	470uF		
C7	100n		
C8	100n		
C9	47uF		
C10	100n		
C11	100n		
D2	1N4148		
D3	1N4148		
D4	1N4148		
D5	1N4148		
HALL	TLA4905L		
IC2	MEGA16-A		
IO1	78L05		
IO2	78L12		
IO3	78L18		
IO4	78L18		
K1	G6H2-100		
K2	G6H2-100		
K3	G6H2-100		
K4	G6H2-100		
K5	ARK500/2		
K6	ARK500/2		
K7	ARK500/2		
K8	ARK500/2		
K9	ARK500/2		
L1	33uH		
LED	RGB dioda		
Q1	16MHz		
R1	10k		
R2	100R		
R3	1k		
R4	1k		
R5	1k		
R6	1k		
R7	150R		
R8	65R		
R9	25R		
S1	reset		
SV2	encoder		
SV3	CANON 9 pin		
SV4	LCD		

## Příloha 3:

### Osazení bottom

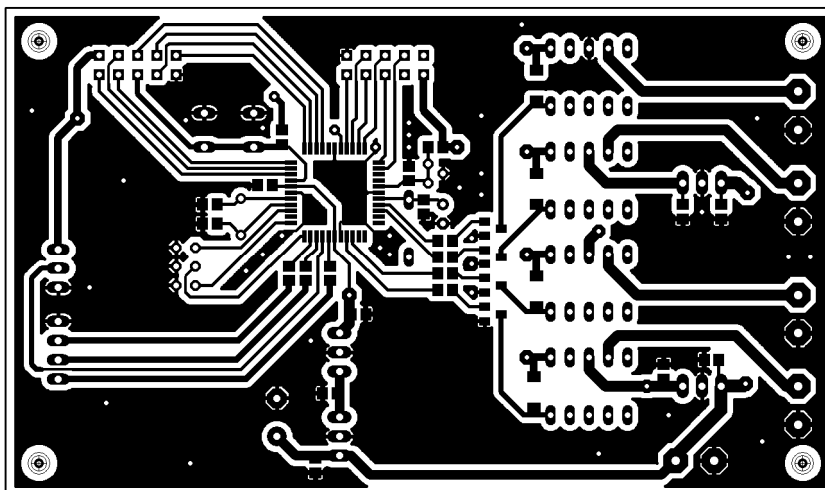


### Osazení tom

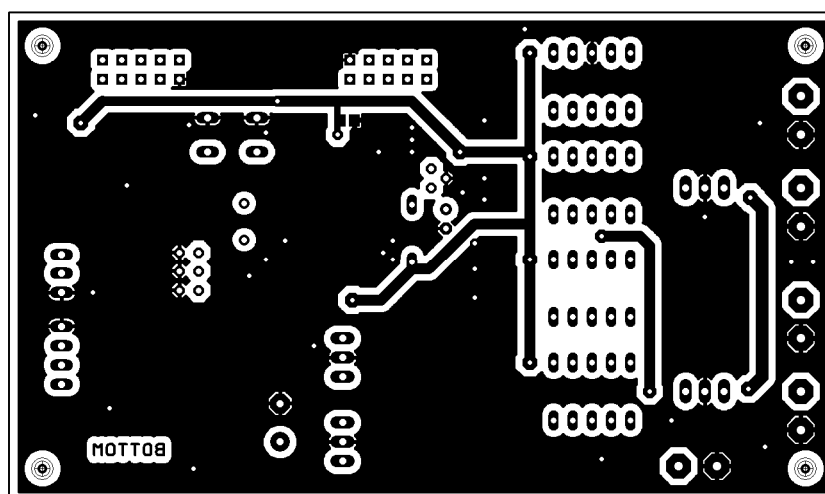


## Příloha 4:

Motiv DPS TOP

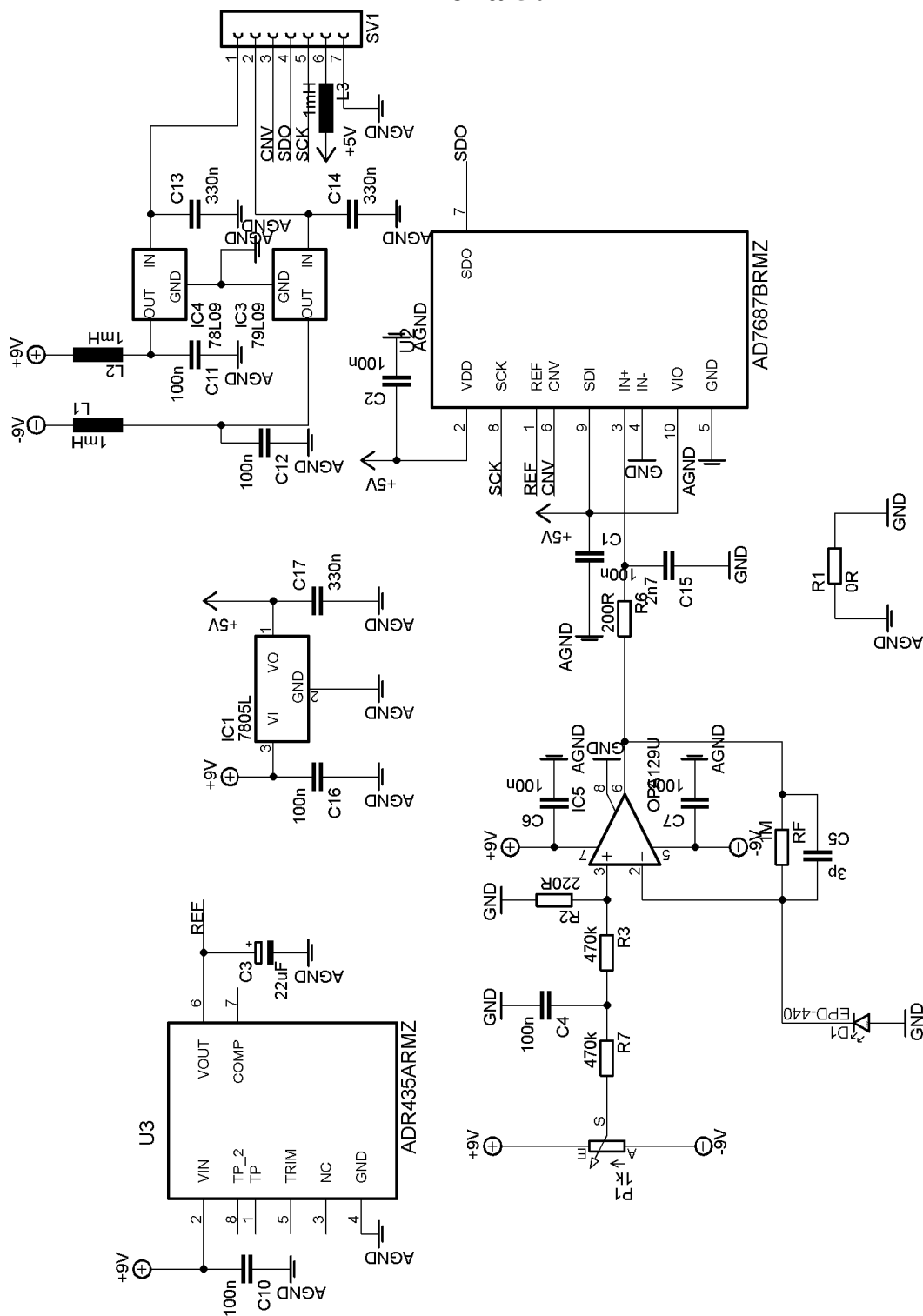


Motiv DPS Bottom





## Příloha 5:



## Příloha 6:

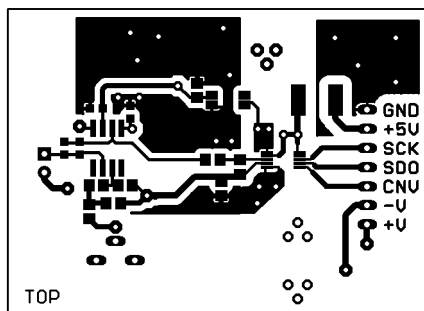
Part	Value
C1	100n
C2	100n
C3	22uF
C4	100n
C5	3p
C6	100n
C7	100n
C10	100n
C11	100n
C12	100n
C13	330n
C14	330n
C15	2n7
C16	100n
C17	330n
D1	EPD-440
IC1	7805L
IC3	79L09
IC4	78L09
IC5	OPA129U
L1	1mH
L2	1mH
L3	1mH
P1	1k
R1	0R
R2	220R
R3	470k
R6	200R
R7	470k
RF	1M
SV1	7-pin connector
U2	AD7687BRMZ
U3	ADR435ARMZ

## Osazení Bottom

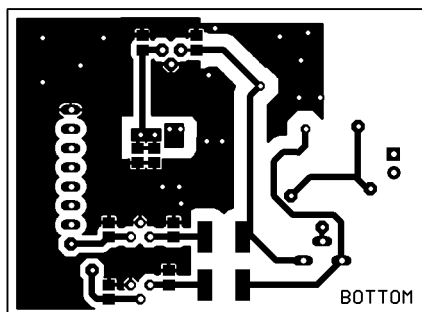


## Příloha 8:

### Motiv DPS TOP



### Motiv DPS Bottom



## Příloha 9:

Závislost výstupního napětí v různých bodech osvitky [mV]

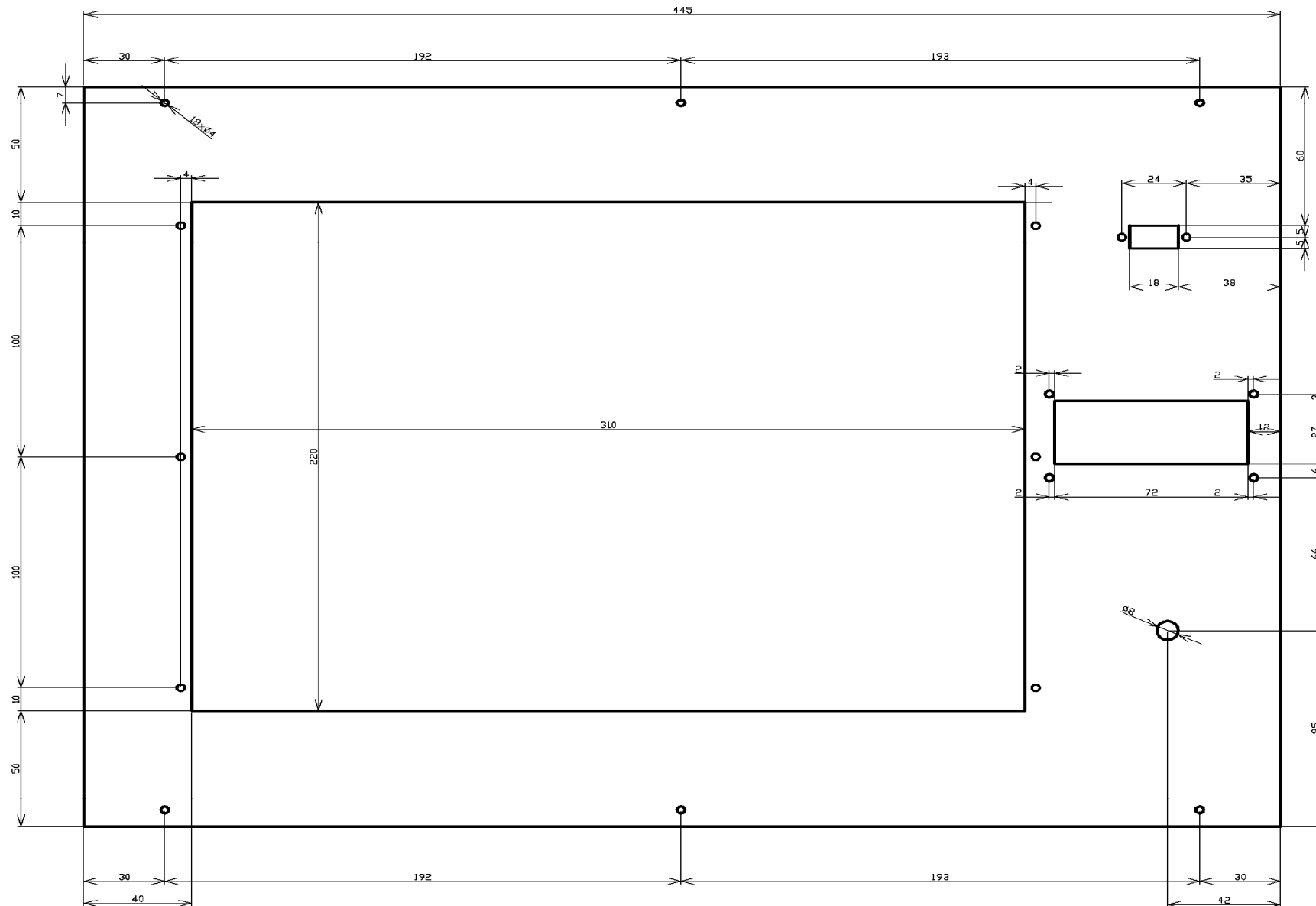
cm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	15	32	193	242	248	321	411	476	512	506	610	633	641	675	622	533	464	605	505	538	523	513	461	498	475	446	490	492	327	455
2	11	51	86	263	257	367	424	503	567	561	713	693	677	692	714	615	538	659	573	610	550	537	521	550	506	468	503	570	367	472
3	96	50	93	260	243	371	477	544	558	574	719	730	692	699	737	609	632	551	611	591	601	569	501	512	512	496	524	599	386	474
4	25	56	97	258	260	452	476	522	582	579	624	695	687	737	743	602	568	556	559	533	537	558	531	504	496	450	505	578	394	446
5	24	54	95	242	242	390	482	564	617	560	715	667	694	691	654	578	530	535	549	567	527	550	547	555	514	485	507	623	407	398
6	23	64	85	260	256	386	456	531	566	569	632	672	643	571	546	545	529	517	537	551	522	541	513	545	513	479	543	589	398	382
7	12	59	91	251	242	391	461	514	560	541	582	576	584	611	510	558	522	541	551	561	541	536	522	540	529	471	511	452	395	395
8	15	58	86	216	231	366	440	517	577	588	576	620	603	531	627	525	518	518	540	571	558	548	504	542	487	505	464	438	391	389
9	17	59	82	233	259	379	421	506	500	540	586	549	526	529	574	510	507	514	553	528	552	551	507	532	494	462	452	427	395	401
10	20	56	75	246	245	378	447	513	565	547	552	593	520	488	515	499	505	515	511	538	573	540	518	499	465	455	454	442	411	393
11	26	59	88	236	241	372	430	511	514	544	525	556	493	485	473	505	494	510	523	529	519	513	492	502	480	447	443	437	402	402
12	30	58	91	237	256	32	416	487	538	534	573	538	481	487	462	515	491	504	499	514	512	511	497	496	473	446	460	428	405	410
13	25	55	87	238	270	373	439	465	535	504	516	548	485	479	475	508	481	491	497	509	511	514	478	502	466	465	451	440	399	395
14	24	52	90	231	255	417	421	460	515	481	470	514	475	495	467	500	502	492	491	488	484	486	458	477	469	453	446	427	391	387
15	26	86	85	225	242	385	428	451	486	495	487	497	485	498	476	505	473	469	467	487	481	480	439	460	442	457	434	431	396	381
16	46	44	78	211	228	370	401	423	480	463	478	518	482	491	483	493	462	460	471	474	466	468	440	551	446	444	445	420	378	371
17	25	82	72	208	239	365	357	456	466	482	490	481	480	493	473	479	459	459	447	547	457	454	416	448	434	430	440	414	381	372
18	24	40	76	191	212	314	386	402	405	475	498	535	472	486	445	458	440	434	425	461	455	462	391	412	401	437	408	429	392	373
19	13	36	66	173	201	282	343	367	331	453	465	391	439	447	395	441	411	416	348	439	427	441	338	378	346	412	362	388	377	350
20	14	34	59	134	156	224	316	280	269	413	420	351	406	386	312	363	347	366	312	421	402	397	302	304	321	383	296	365	343	323
21	13	25	50	113	145	192	256	249	258	339	365	284	334	311	309	352	304	320	265	356	342	337	296	270	319	327	284	297	272	264

## Příloha 10:

Velikost intenzity v různých částech osvitky [mW/cm<sup>2</sup>]

cm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	0,01	0,02	0,12	0,16	0,16	0,21	0,27	0,31	0,33	0,33	0,39	0,41	0,41	0,44	0,4	0,34	0,3	0,39	0,33	0,35	0,34	0,33	0,3	0,32	0,31	0,29	0,32	0,32	0,21	0,29
2	0,01	0,03	0,06	0,17	0,17	0,24	0,27	0,32	0,37	0,36	0,46	0,45	0,44	0,45	0,46	0,4	0,35	0,43	0,37	0,39	0,35	0,35	0,34	0,35	0,33	0,3	0,32	0,37	0,24	0,3
3	0,06	0,03	0,06	0,17	0,16	0,24	0,31	0,35	0,36	0,37	0,46	0,47	0,45	0,45	0,48	0,39	0,41	0,36	0,39	0,38	0,39	0,37	0,32	0,33	0,33	0,32	0,34	0,39	0,25	0,31
4	0,02	0,04	0,06	0,17	0,17	0,29	0,31	0,34	0,38	0,37	0,4	0,45	0,44	0,48	0,48	0,39	0,37	0,36	0,36	0,34	0,35	0,36	0,34	0,33	0,32	0,29	0,33	0,37	0,25	0,29
5	0,02	0,03	0,06	0,16	0,16	0,25	0,31	0,36	0,4	0,36	0,46	0,43	0,45	0,45	0,42	0,37	0,34	0,35	0,35	0,37	0,34	0,35	0,35	0,36	0,33	0,31	0,33	0,4	0,26	0,26
6	0,01	0,04	0,05	0,17	0,17	0,25	0,29	0,34	0,37	0,37	0,41	0,43	0,41	0,37	0,35	0,35	0,34	0,33	0,35	0,36	0,34	0,35	0,33	0,35	0,33	0,31	0,35	0,38	0,26	0,25
7	0,01	0,04	0,06	0,16	0,16	0,25	0,3	0,33	0,36	0,35	0,38	0,37	0,38	0,39	0,33	0,36	0,34	0,35	0,36	0,36	0,35	0,35	0,34	0,35	0,34	0,3	0,33	0,29	0,25	0,25
8	0,01	0,04	0,06	0,14	0,15	0,24	0,28	0,33	0,37	0,38	0,37	0,4	0,39	0,34	0,4	0,34	0,33	0,33	0,35	0,37	0,36	0,35	0,33	0,35	0,31	0,33	0,3	0,28	0,25	0,25
9	0,01	0,04	0,05	0,15	0,17	0,24	0,27	0,33	0,32	0,35	0,38	0,35	0,34	0,34	0,37	0,33	0,33	0,33	0,36	0,34	0,36	0,36	0,33	0,34	0,32	0,3	0,29	0,28	0,25	0,26
10	0,01	0,04	0,05	0,16	0,16	0,24	0,29	0,33	0,36	0,35	0,36	0,38	0,34	0,31	0,33	0,32	0,33	0,33	0,33	0,35	0,37	0,35	0,33	0,32	0,3	0,29	0,29	0,29	0,27	0,25
11	0,02	0,04	0,06	0,15	0,16	0,24	0,28	0,33	0,33	0,35	0,34	0,36	0,32	0,31	0,31	0,33	0,32	0,33	0,34	0,34	0,33	0,33	0,32	0,32	0,31	0,29	0,29	0,28	0,26	0,26
12	0,02	0,04	0,06	0,15	0,17	0,02	0,27	0,31	0,35	0,34	0,37	0,35	0,31	0,31	0,3	0,33	0,32	0,33	0,32	0,33	0,33	0,33	0,32	0,32	0,31	0,29	0,3	0,28	0,26	0,26
13	0,02	0,04	0,06	0,15	0,17	0,24	0,28	0,3	0,35	0,33	0,33	0,35	0,31	0,31	0,31	0,33	0,31	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33	0,31	0,32	0,3	0,3	0,29	0,28	0,26	0,25
14	0,02	0,03	0,06	0,15	0,16	0,27	0,27	0,3	0,33	0,31	0,3	0,33	0,31	0,32	0,3	0,32	0,32	0,32	0,32	0,31	0,31	0,31	0,3	0,31	0,3	0,29	0,29	0,28	0,25	0,25
15	0,02	0,06	0,05	0,15	0,16	0,25	0,28	0,29	0,31	0,32	0,31	0,32	0,31	0,32	0,31	0,33	0,31	0,3	0,3	0,31	0,31	0,31	0,28	0,3	0,29	0,29	0,28	0,28	0,26	0,25
16	0,03	0,03	0,05	0,14	0,15	0,24	0,26	0,27	0,31	0,3	0,31	0,33	0,31	0,32	0,31	0,32	0,3	0,3	0,3	0,31	0,3	0,3	0,28	0,36	0,29	0,29	0,29	0,27	0,24	0,24
17	0,02	0,05	0,05	0,13	0,15	0,24	0,23	0,29	0,3	0,31	0,32	0,31	0,31	0,32	0,31	0,31	0,3	0,3	0,29	0,35	0,29	0,29	0,27	0,29	0,28	0,28	0,28	0,27	0,25	0,24
18	0,02	0,03	0,05	0,12	0,14	0,2	0,25	0,26	0,26	0,31	0,32	0,35	0,3	0,31	0,29	0,3	0,28	0,28	0,27	0,3	0,29	0,3	0,25	0,27	0,26	0,28	0,26	0,28	0,25	0,24
19	0,01	0,02	0,04	0,11	0,13	0,18	0,22	0,24	0,21	0,29	0,3	0,25	0,28	0,29	0,25	0,28	0,27	0,27	0,22	0,28	0,28	0,28	0,22	0,24	0,22	0,27	0,23	0,25	0,24	0,23
20	0,01	0,02	0,04	0,09	0,1	0,14	0,2	0,18	0,17	0,27	0,27	0,23	0,26	0,25	0,2	0,23	0,22	0,24	0,2	0,27	0,26	0,26	0,19	0,2	0,21	0,25	0,19	0,24	0,22	0,21
21	0,01	0,02	0,03	0,07	0,09	0,12	0,17	0,16	0,17	0,22	0,24	0,18	0,22	0,2	0,2	0,23	0,2	0,21	0,17	0,23	0,22	0,22	0,19	0,17	0,21	0,21	0,18	0,19	0,18	0,17

# Příloha 11:



## Příloha 12:

